

05.16.02
Т417

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ТИМОШПОЛЬСКИЙ Владимир Исаакович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАЗРАБОТКА
РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ,
ОХЛАЖДЕНИЯ, НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ
И ЗАГОТОВОК**

05.16.02 — Metallургия черных металлов

**Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук**

Челябинск 1991

Работа выполнена в НТО "Политехник" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук,
профессор СОРОКА Б.С.
- доктор технических наук,
профессор ТОРОПОВ Е.В.
- доктор технических наук,
профессор ЯКОВЛЕВ Ю.Н.

Ведущая организация

- Государственный ордена
Трудового Красного Знамени
союзный институт
"Стальпроект" (г.Москва)

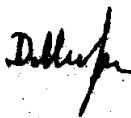
Защита диссертации состоится " 15 " мая 1991 г.
в 14-00 часов на заседании специализированного совета
Д.053.13.04 Челябинского государственного технического универ-
ситета, 454080, Челябинск, проспект Ленина, 76, ауд.244.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинско-
го государственного технического университета.

Автореферат разослан " 18 " марта 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

доктор физико-математических
наук, профессор



Д.А.Мирзаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Черная металлургия занимает по праву одно из приоритетных мест среди всех отраслей народного хозяйства, так как является основным поставщиком продукции для машиностроения, химической, авиационной промышленности и др.

В настоящее время в отрасли около 70% стали будет производиться традиционным способом - литьем в изложницу с целью последующей подготовки высококачественного слитка (отливки) к нагреву и прокатке на обжимных станах. Поэтому многие технологические схемы при получении металлопроката необходимого качества строятся на основе блумингового (слябингового) слитка.

Наряду с проблемой выхода слитков высокого качества в черной металлургии поставлены задачи, направленные на создание энергосберегающих технологий. Не вызывает сомнений, что экономное и бережливое отношение к топливно-энергетическим ресурсам в значительной мере определяет темпы научно-технического прогресса отрасли и страны. Поэтому запланировано сократить удельный расход топлива, отнесенный на всю сталь, с 1191,3 кг/т в 1986 г. до 1115 кг/т в 1991 г.

Отмеченные нами показатели свидетельствуют: из всего многообразия задач, поставленных перед черной металлургией, выделено просматриваются следующие - создание и внедрение новейших высокоэффективных технологических процессов, в том числе превосходящих лучшие зарубежные аналоги, а также модернизация действующих с целью улучшения качественных показателей металлопродукции, разработка и внедрение энергосберегающих технологий.

Анализ состояния "прохождения" промышленным слитком от выплавки, разливки, прокатки до получения готовой продукции показывает, что задачи, связанные с повышением производительности агрегатов, рациональным использованием тепловой энергии и направленные на улучшение качества стали, необходимо решать комплексно. Для конкретных условий необходимо, основываясь на накопленном за многие десятилетия опыте ученых-металлургов, разработать новые методы экспериментального и теоретического исследования теплотехнологий формирования слитков (отливок) при затвердевании, охлаждении и тепловой обработке с учетом особенностей металлургических процессов.

В связи с отмеченным выше, исследование закономерностей режимов затвердевания, охлаждения и нагрева металла, направленное на создание ресурсосберегающих технологий при производстве стальных слитков и заготовок, является актуальным.

Цель работы. Создания теоретических основ для расчетов режимов затвердевания, охлаждения и нагрева слитков и заготовок, нагревательных печей; разработка ресурсосберегающих технологий при прохождении стальным слитком от разливки до получения готовой металлопродукции.

Научная новизна. Разработаны новые теоретические представления о ходе совмещенного теплотехнологического процесса "затвердевание - охлаждение - нагрев" листовых, цилиндрических и призматических слитков (отливок) с учетом термодформационных явлений. Получены новые закономерности, существенно влияющие на динамику совмещенного процесса.

Разработаны математические модели нагрева неограниченного и короткого сплошного круговых цилиндров в кольцевых печах с вращающимся подом осадочного стана 250 на основе применения многозональной упрощенной схемы, с учетом их взаимного расположения, изменяющегося по периметру результирующего теплового потока, кинетики роста печной окалины и торцевого эффекта.

Разработаны новые методики расчетов режимов затвердевания, охлаждения и нагрева слитков и заготовок, которые основываются на: балансовых методах, например, Лейбена-Вейнцка (расчеты режимов затвердевания слитка) и интегральных преобразованиях (расчеты режимов нагрева слитков в форме сплошного кругового цилиндра, пластины, неограниченной призмы и призмы ограниченных размеров), методе эквивалентных источников и уточненного регулярного этапа (расчеты режимов нагрева термически массивных пластин и цилиндров с учетом расчленения единого по Фурье процесса распространения теплоты).

Новизной и перспективностью отличаются результаты по исследованию режимов тепловой обработки массивных пластин и цилиндров. В этом случае получены новые закономерности о динамике упруго-пластических деформаций и напряжений, например, при продолжительном нагреве. Впервые в качестве критериев оптимальности определены величина упруго-пластических напряжений и количество жидкой сердцевины при нагреве слитков.

На основе новых теоретических положений, подкрепленных результатами промышленных опробований, разработаны новые способы тепловой обработки слитков и заготовок (а.с. СССР № 1381179, 1500426, положительное решение к заявке № 4066699/02, положительное решение к заявке № 4066698/02).

Практическая ценность. Прикладное значение имеют результаты, полученные при изучении "совмещенного" процесса и расчетного анализа по нагреву крупных слитков, которые систематизированы в виде таблиц, графиков, номограмм и подробно описаны.

Большое значение приобретает:

- инженерные способы расчета совмещенного теплотехнологического процесса подготовки слитка к прокатке, нагревательной ячейки при заданной тепловой мощности, основанные на номограммах, разработанных автором;

- трехступенчатый режим нагрева слитков с жидкой сердцевинной в ячейке нагревательного колодца.

Математические модели нагрева массивного металла позволяют исследовать температурные и тепловые режимы методических печей при любой их производительности, произвольном межосевом расположении металла на поду (кольцевые печи), а принципы построения и реализации моделей могут быть перенесены на нагревательные устройства непрерывного действия иной конструкции.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными организациями: Стальпроект (г.Москва); Гипромез (г.Москва); Теплопроект (г.Москва); УкрГипромез (г.Днепропетровск); ВНИИМТ (г.Свердловск); ИЧМ Министерства металлургии СССР, а также технологическими и теплотехническими лабораториями металлургических предприятий и др.

Некоторые теоретические разработки вошли в учебные пособия: "Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки".- Минск: Высшая школа, 1988.-320 с.; "Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах".-Минск: Высшая школа, 1992 (18 п. л.) (принято к печати); в справочное пособие "Нагрев стали".- Минск, 1989.-314 с., таким образом, внедрены в учебный процесс.

Реализация и внедрение работы в промышленности. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, прошли опытно-промышленное опробование и внедрены на Днепровском металлургическом комбинате им.Ф.Э.Дзержинского, Новосибирском металлурги-

ческом заводе специальных сталей и сплавов им. Кузнецова, Белорусском металлургическом заводе.

По Днепровскому металлургическому комбинату:

- внедрен режим дифференцированной подачи природного газа при нагреве слитков горячего проката в ячейках колодцев алюминта "И150";

- внедрены температурно-тепловые режимы методических печей трубозаготовочного стана 900/750;

- внедрены температурно-тепловые режимы кольцевых печей стана 250 и др.

По Новосибирскому металлургическому заводу специальных сталей и сплавов:

- внедрены температурно-тепловые режимы нагрева металла в методических печах стана 810.

По Белорусскому металлургическому заводу:

- внедрены режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методической печи с комбинированным механизированным подом: шагающими балками и шагающим подом мелкосортного стана 320/150.

Экономический эффект от внедрения разработок, выполненных под руководством автора, за счет увеличения производительности агрегатов, снижения удельного расхода топлива и окислительнообразования, улучшения качества металла и др. составляет $\sim 2,0$ млн. рублей.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы за твердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков и заготовок с целью внедрения ресурсосберегающих технологических процессов, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Апробация работы. Работа выполнена в комплексной научно-производственной лаборатории "Проблемы металлургического производства" научно-технического объединения "Политехник" Белорусского политехнического института.

Основные результаты диссертации докладывались на Всесоюзном семинаре "Совершенствование методов нагрева и охлаждения металла в прокатном производстве", Москва, ВДНХ СССР, 1979 г.; на Всесоюзной конференции молодых ученых "Теплообмен и физико-химические процессы в энергетических установках", Минск, 1985 г.; на Всесоюзном научно-техническом совещании "Повышение техниче-

кого уровня нагревательных устройств в прокатном производстве", Москва, ВДНХ СССР, 1987 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Энергосберегающие технологии и теплоэнергетические проблемы оптимизации печного хозяйства металлургических предприятий", Мясс, 1987 г.; на Всесоюзной конференции "Применение ЭВМ в управлении химико-металлургическими процессами", Свердловск, 1987 г.; на республиканских научно-технических конференциях "Теория и практика тепловой работы металлургических печей"; "Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии", Днепропетровск, 1988, 1989 гг.; на Всесоюзном научно-техническом совещании "Интенсификация тепловых, массообменных и физико-химических процессов в металлургических агрегатах", Свердловск, 1989 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии", посвященной 60-летию ВНИИМТ, Свердловск, 1990 г.; на международных конференциях "Научна сесия ВМЭИ "Ленин'89", г.София, НРБ; *Proceedings of the 5th International Continuous Casting Conference, June 18-20, 1990, Linz/Austria* и др.

Теоретические положения и разработанные под руководством автора технологии приведены в заключительных отчетах к научно-исследовательским работам (номера государственной регистрации 79025924, 80025250, 01.860050061, 01.880029037 и др.).

При проведении ряда исследований автору оказали помощь доктор техн. наук, профессор Ю.А.Самойлович, кандидаты техн. наук* И.А.Трусова, В.Б.Ковалевский, Н.Л.Мандель, Д.Г.Седяко.

Автор защищает:

- системный подход с целью создания ресурсосберегающих режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков и заготовок, в том числе в "совмещенном" процессе;

- результаты экспериментальных исследований, полученных в производственных условиях;

- математические модели, теоретические и практические результаты нагрева сплошных и полых круговых цилиндров в кольцевых печах с вращающимся подом;

- методики расчетов нагрева и охлаждения термически массивных заготовок и слитков в промышленных печах с использованием схемы теплового пограничного слоя, методов эквивалентных источ-

* Диссертации выполнены под руководством автора.

ников и уточненного регулярного этапа;

- методики расчета температур, напряжений и деформаций в термически массивных пластине и цилиндре;

- инженерные методы расчета нагрева слитков в ячейке колодца, базирующиеся на номограммах, а также идеологию трехступенчатого температурного режима ячейки при нагрева слитков с жидкой сердцевиной;

- алгоритмы оптимального управления режимами нагрева термомассивных тел по условиям их термической прочности;

- новые способы тепловой обработки слитков и заготовок;

- ресурсосберегающую технологию нагрева и охлаждения стали, внедрение ее с реальным экономическим эффектом около 2,0 млн. рублей.

Публикация материалов. Основное содержание диссертации опубликовано более чем в 100 научных работах, в том числе 3 книгах, 95 статьях и тезисах докладов, защищено тремя изобретениями СССР на способы тепловой обработки металла.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из двух частей: основного текста (первая часть) и семи приложений (вторая часть). Изложена на 291 странице машинописного текста и иллюстрируется 121 рисунком и 28 таблицами, состоит из введения, 6 глав, заключения по работе в целом и выводов по главам. Список использованной литературы включает 332 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы создания теоретических основ и ресурсосберегающих теплотехнологий, которые необходимо развивать сегодня и в последующие годы при организации режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стали.

I. Состояние вопроса исследований. Постановка задач диссертационной работы. Глава включает десять разделов. Рассмотрены библиографии, в которых первостепенное значение приобретают результаты тепловой обработки крупных слитков в линиях "разливка - охлаждение - нагрев - прокатка", а также среднесортного и мелкосортового проката в нагревательных печах.

На основании обобщения литературных сведений, производственного опыта, некоторых предварительных исследований автора в

работе сформулированы следующие задачи.

1. Разработать теоретические основы режимов затвердевания, охлаждения и нагрева металла, которые включают совмещенный процесс "затвердевание - охлаждение - нагрев слитков (отливок)", технологию тепловой обработки стали в печах прокатного производства различного конструктивного оформления.

2. Выполнить серии экспериментальных исследований для совмещенных процессов.

3. Разработать более современные математические модели совмещенных теплотехнологических процессов, а также математические модели тепловой работы нагревательных и термических печей.

Осуществить параметрическую идентификацию математических моделей на исследуемых объектах.

4. Разработать инженерные методы расчетов металлургических печей, которые должны включать:

- задание результирующего теплового потока к металлу в виде совместного действия конвекции и излучения;

- переменность теплофизических характеристик нагреваемого (охлаждаемого) материала;

- вычисление упруго-пластических деформаций и напряжений в термически массивных телах (пластина и цилиндр);

- анализ влияния теплофизических и физико-механических нелинейностей на динамику процессов нагрева металла и др.

При этом инженерные методики должны использоваться как в случаях оперативных теплотехнических расчетов без привлечения ЭВМ, так и с применением ЭВМ, персональных вычислительных машин последнего поколения и др.

5. Разработать теоретические основы выбора оптимальных режимов нагрева стали в промышленных печах прокатного производства с учетом технологических ограничений.

6. На основании исследований выполнить теплотехническое обоснование режимов тепловой обработки слитков и заготовок, в том числе совмещенных процессов "затвердевание - охлаждение - нагрев", "нагрев - охлаждение (прокатка) - нагрев" и т.д.

7. Разработать ресурсосберегающую технологию охлаждения и нагрева слитков и заготовок в промышленных печах, функционирующих в линиях прокатных станков, в том числе нагрева слитков горячего посада и с жидкой сердцевиной, осевых и трубных загото-

вок, термической обработки черного проката и внедрить новые (аффективные) режимы в промышленность.

2. Экспериментальные исследования режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стали. В главе подробно описаны методики экспериментов при исследовании режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков и заготовок, в том числе на специальных печах.

Результаты экспериментов включают около 30 температурных диаграмм, которым дан детальный анализ.

Подготовлена экспериментально-нормативная база к математическому моделированию высокотемпературных процессов, протекающих при охлаждении и нагреве стали в печах прокатного производства.

Материал, касающийся обсуждения экспериментальных исследований, в основном опубликован в работах /4, 6, 10, 17, 24, 28 и др./.

3. Математическое моделирование, расчеты и анализ технологического процесса нагрева и охлаждения крупных слитков, в том числе совмещенного теплотехнологического процесса. Расчеты нагрева стальных слитков перед прокаткой имеют целью установить наиболее приемлемый оптимальный для конкретного технологического процесса режим до заданной, например, 1450...1550 К, температуры при определенной неравномерности, либо с целью ее избежания к моменту выдачи металла.

Автором диссертационной работы разработаны и дополнены теоретические основы нагрева крупных слитков в ячейках нагревательных колодцев с детальным исследованием закономерностей внутреннего теплообмена. При математическом моделировании режимов нагрева слитков был рассмотрен достаточно широкий диапазон марок сталей по характеру зависимостей коэффициентов теплопроводности от температуры.

Решение сформулированной задачи для горизонтального сечения алюминитового слитка выполнено при использовании уравнения явного вида по методу До-Фора и Франкала.

В соответствии с обоснованно выбранной численной схемой для решения уравнения нестационарной теплопроводности разработаны программы и подпрограммы для проведения серии численных экспериментов по нагреву слитков. Численные эксперименты на ЭЦВМ выполнены с целями анализа влияния теплотехнических и технологических

параметров на динамику нагрева слитков в ячейке колодца*.

Анализировалось влияние:

- теплофизических свойств (химического состава) нагреваемого металла; начальной температуры металла и степени неравномерности для слитков горячего посада; размера поперечного сечения слитка; температурного режима ячейки; коэффициента излучения σ_b ; асимметрии параметров нагрева и др.

Результаты численных экспериментов обобщены в виде графиков, иллюстрирующих наиболее характерные детали процессов нагрева. В приложении 2 приведен альбом графиков нагрева промышленных слитков шести групп марок сталей, которые, по мнению автора, могут найти широкое применение в производственных условиях.

Далее исследован совмещенный процесс.

При этом в случае двухмерного (горизонтального) сечения слитка начальные и граничные условия совмещенного процесса имеют вид:

$$T|_{x=0} = T_1, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = 0; \quad (1)$$

$$\lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_{x_1=l} = \alpha_k (T_2 - T) - \sigma_b (T^4 - T_c^4). \quad (2)$$

Задача формирования деформаций и напряжений в слитке описывается системой уравнений в общепринятых обозначениях (общий случай)

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{ij,j} &= 0; \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p + \Delta \varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} \Delta \varepsilon^T; \\ \Delta \varepsilon_{ij,kl} + \Delta \varepsilon_{kl,ij} - \Delta \varepsilon_{jk,il} - \Delta \varepsilon_{lk,ji} &= 0; \\ \Delta \sigma_{ij} n_i &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

При дополнении исходной задачи уравнениями для вычисления печной и воздушной окалины использованы литературные данные.

В качестве численных методов решения применены методы конечных разностей (задача (1), (2)) и конечных элементов (задача (3)).

* Численные эксперименты выполнены совместно с докт. техн. наук, профессором Ю.А.Самойловичем.

Решение нелинейной тепловой задачи осуществлено локально-одномерным численным методом по неявной конечно-разностной схеме с равномерной сеткой.

В дальнейшем с целью уточнения параметров внешнего теплообмена выполнили настройку математической модели по результатам промышленного эксперимента схлаждения промышленного слитка, описанного в предыдущей главе. Следует отметить, что идентифицированная математическая модель обладает достаточной точностью: максимальные расхождения по температурам (2...3%) имеют место в период снятия теплоты перегрева расплава над температурой ликвидус. В последующей стадии охлаждения слитка величина погрешности расчетных и измеренных величин уменьшается, что позволяет реализовать численный эксперимент в совмещенном процессе.

Необходимо отметить, что впервые в теории расчетов нагрева и охлаждения на примере совмещенного процесса выполнен анализ математических моделей температурных напряжений.

Сопоставлялись: упругая, упругопластическая, вязкоупругая, вязкоупругопластическая модели. Установлено, что:

- при построении деформационной модели затвердевания слитка целесообразно использовать представление о вязкоупругом поведении материала;

- с точки зрения опасности возникновения трещин в слитке к концу нагрева наиболее предпочтительным является нагрев слитка с жидкой сердцевиной;

- в расчетах нагрева стального слитка с холодного посада целесообразно применение упругопластической модели.

Представлены иллюстрации перераспределений температурных напряжений при затвердевании, охлаждении и нагреве стального слитка.

Результаты численных экспериментов после соответствующей обработки обобщены в виде набора номограмм, одна из которых приведена на рис. I.

Приведенная номограмма позволяет определить температурное состояние слитка в момент разведения ($T_{гp}^{разд}$, $T_{ч}^{разд}$, $T_{y}^{разд}$) и посада ($T_{гp}^H$, $T_{ч}^H$, T_{y}^H) в нагревательную ячейку, время нагрева поверхности слитка ($T_{н}$), время достижения необходимой температуры поверхностью ($1250^{\circ}C$) при заданной контрольной температуре ячейки, температуры слитка к моменту окончания процес-

Другие номограммы позволяют определить следующие теплотехнические параметры нагревательной ячейки: необходимую начальную температуру T_0 в момент посадки слитка; время τ_1 подъема температуры ячейки до заданной контрольной температуры (I период нагрева; $M_{\text{общ}} = \text{const}$); общее (суммарное) время $\tau_{\text{общ}}$ пребывания слитка в нагревательной ячейке, а значит и время томления τ_2 ; производительность участка "блужинг - нагревательное устройство" и удельный расход условного топлива.

Методики комплексных расчетов описаны в работах /2,3,18,23,25,26 и др./, а основные результаты переданы Днепровскому металлургическому комбинату им.Ф.Э.Дзержинского.

Исследования, выполненные под руководством автора диссертации, позволили создать новый способ нагрева слитков горячего посада /39/, который в настоящее время используется на регенеративных колодцах блужинга "IIBO".

Основные результаты третьей главы сведены в следующем.

Разработаны теоретические основы режимов затвердевания, охлаждения и нагрева крупных слитков. Дополнение известных способов расчета и математических моделей (в первую очередь И.Д.Семикина, Э.М.Гольдфарба, Ю.А.Самойловича) обобщенными уравнениями термомеханики вносит элемент новизны и позволяет установить качественную и количественную взаимосвязь между технологическими и теплотехническими параметрами. Существующий в настоящее время на металлургических предприятиях контроль теплового состояния слитка по температуре его посада является весьма приближенным. В этом случае не представляется возможным по известным методикам установить истинное теплосодержание слитка и назначить режим нагрева, близкий к реальному (необходимому).

4. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей непрерывного действия. В соответствии с целями и задачами исследования показано, что в конкретном случае и для конкретных объектов исследования необходимы и достаточны математические модели для детального изучения закономерностей внутреннего теплообмена металла. Следует также отметить, что такие модели универсальны в том случае, если имеется качественный эксперимент, позволяющий их оперативно адаптировать к реальным производственным условиям. Необходимая в конкретном случае серия экспериментов проведена автором для печей различного конструктив-

ного оформления и описана во второй главе. Таким образом, на основании изложенных замечаний переходим к обсуждению результатов математического моделирования.

4.1. Тепловая работа методических печей толкательного типа.

$$c(T) \rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (4)$$

$$T \Big|_{x=0} = T_0; \quad (5)$$

$$\pm \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0;L} = q_n^j + q_k^j, \quad (6)$$

где индекс j соответствует пребыванию металла в расчетных зонах печи.

Зональный расход топлива

$$B_j = \frac{(1-j_j) \rho (l_{M_j}^{KB} - l_{M_j}^{NB}) - 5650 \rho_j - V_g (1-K_j) (l_{AT}^{KB} - l_{AT}^{NB}) \sum_{k=j+1}^N B_k}{(1-K_j) (Q_H^p + L_T + V_B L_B - l_{g_j}^{NB} V_g)} \quad (7)$$

Имеем для данного типа печей

$$K_j = 1 - \frac{h_{КАВ}^j}{h_{КИТ}^j}; \quad \frac{h_{КАВ}^j}{h_{КИТ}^j} = 0,46 \dots 0,51.$$

В соответствии с расчетным алгоритмом разработан программный продукт для персональной ЭВМ АТ. Результаты параметрической идентификации показали удовлетворительное согласование между измеренными и расчетными значениями температур в бломе (погрешность величины составляет 1...2%).

На второй стадии расчетного анализа разработана математическая модель расчета температурных напряжений и деформаций. С учетом замечаний, изложенных в I и III главах, имеем:

$$\sigma_y = \sigma_z = \sigma(x); \quad \sigma_x = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0;$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon(x); \quad \delta_{xy} = \delta_{xz} = \delta_{yz} = 0;$$

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon - \varepsilon_p - \alpha T);$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} = 0; \quad (8)$$

$$\int_{-h}^h \sigma dx = 0; \quad \int_{-h}^h \sigma x dx = 0.$$

Исходная модель сведена к интегральному уравнению Фредгольма второго рода

$$\varepsilon(x) = \int_{-h}^h K(x, s) \cdot \varepsilon(s) ds + f(x), \quad (9)$$

решение которого выполнено методом итераций. В соответствии с численно-аналитическим алгоритмом для настройки модели было выполнено ее тестирование по известному решению Паркса. В конкретном случае погрешность решений автора не превышала 1%.

4.2. Тепловая работа кольцевых печей с механизированным вращающимся подом. Автором установлено (главы I, II), что в большинстве случаев имеют место математические модели для случаев записи трехмерного (общий случай), двухмерного уравнений нестационарной теплопроводности. Имеют место и случаи осесимметричного нагрева неограниченного цилиндра. Рассмотрены все встречающиеся варианты нагрева стали в кольцевой печи для случаев гладкой и деформированной подины.

Рассмотрим общий случай нагрева цилиндра ограниченной протяженности:

$$c(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial z} \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (10)$$

$$T = T(r, \varphi, z, \tau); \quad (11)$$

$$0 < z < R; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi; \quad 0 \leq z \leq h; \quad \tau > 0; \quad (12)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R} = \alpha_{\Sigma}(\varphi)(T_c - T); \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = \alpha_{\Sigma}(T_c - T); \quad (13)$$

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_1 + \alpha_k; \quad \alpha_1 = \sigma(\varphi)(T_c^2 + T^2)(T_c + T); \quad \sigma(\varphi) = \sigma \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cos i \varphi. \quad (14)$$

Значения $\sigma(\varphi)$ определялись в соответствии с рекомендациями Всесоюзного НИИ трубной промышленности (г.Днепропетровск), где в результате обработки экспериментальных результатов даны рекомендации для числовых значений весовых коэффициентов α_i . Автором диссертации впервые внедрен в инженерную практику технологии нагрева стали в кольцевых печах метод расчета внутреннего теплообмена, когда отношение поверхностного теплового потока к максимально возможному описывается зависимостью:

$$q(\varphi; S/D) / q_{\max} = \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cos i \Delta \varphi,$$

что позволяет значительно упростить выполнение расчетов режимов нагрева стали.

На последующей стадии, по аналогии с § 4.1, выполнена параметрическая идентификация математических моделей вида (10)... (14) по результатам производственных экспериментов. При этом в виде конечно-разностного аналога исходной записи уравнения (10) выбрана схема Дю-Фора и Франкела. Результаты параметрической настройки показали, что максимальные расхождения измеренных и рассчитанных температур, например, для трехмерного и неограниченного цилиндров, составляют в среднем 1..2%. О корректности постановки задачи говорит и тот факт, что суммарный расход топлива на печь, полученный расчетным способом (по формуле (7)), например, для заготовки диаметром 0,23 м, составил 1560 м³/ч и незначительно отличается от фактического, равного 1600 м³/ч.

Далее, по аналогии с нагревом пластины, разработан способ расчета температурных напряжений и деформаций в упругопластической постановке для цилиндра.

В последующих разделах впервые в теории расчетов режимов нагрева стали в промышленных печах выполнен анализ влияния теплофизических и физико-механических параметров на динамику процесса формирования температурных напряжений и выполнены комплексные термомеханические расчеты. Для этой цели проведены серии численных экспериментов. Каждый эксперимент проводился при наборе теплофизических и механических характеристик, зависящих от температуры или принимающих постоянные значения: $\alpha_k = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $\sigma_0 = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^1)$; $\bar{\lambda}_0 = 45,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\bar{\tau}_{\nu 0} = 5,05 \text{ МПа}/(\text{м}^3\text{град})$; $\bar{\sigma}_{\text{тп}} = 18,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $\bar{\alpha}_0 = 13,05 \text{ 1}/\text{град}$.

Рассмотрим решение сформулированных задач (8), (9) для мас-

сивной пластины. Исходные данные: сталь 45; $H = 0,135$ м; $T_0 = 293$ К; $T_{печ} = \text{const} = 1163$ К.

Результаты вычислений представлены на рис.2 (а,б).

Из приведенных термограмм (а) следует, что наибольшее влияние на продолжительность нагрева оказывает теплоемкость C_v . Действительно, выбор в качестве расчетного среднего значения теплоемкости \bar{C}_v для конкретного варианта сокращает продолжительность нагрева \sim на 10%. Принятие допущений $\lambda = \bar{\lambda} = \text{const}$; $C_v = \bar{C}_v = \text{const}$ может привести к существенным погрешностям при проектировании нагревательного устройства, в частности, к несоответствию расчетной и действительной производительности в сторону ее снижения, и, таким образом, может оказаться сдерживающим фактором в линии "нагревательное устройство - прокатный стан".

Из графиков, приведенных на рис.2(б), следует, что значения максимальных температурных напряжений практически не зависят от способа задания термомеханических параметров. В то же время значения напряжений к моменту выдачи металла из печи и, таким образом, значения остаточных напряжений сильно разнятся. В качестве эталона при анализе отмеченных графиков выбрана кривая изменения температурных напряжений при всех переменных параметрах: $\lambda(T)$; $C_v(T)$; $E(T)$; $\mu(T)$; $\alpha(T)$. Анализ кривых изменения напряжений показывает, что наибольшее влияние в конкретном случае на величину термонапряжений оказывает коэффициент линейного расширения α . Принятие же в расчетах $\bar{\lambda} = \text{const}$; $\bar{C}_v = \text{const}$; $E = \text{const}$; $\mu = \text{const}$; $\alpha = \text{const}$ вовсе недопустимо в связи с тем, что может привести к ошибке по величине остаточных напряжений в 3...5 раз в сторону их занижения.

Аналогичные выводы сделаны и в случае нагрева сплошного кругового цилиндра. Результаты численных экспериментов, приведенные в главе IV, имеют, по мнению автора, научное и прикладное значение.

В соответствии с исходной системой уравнений (4)...(6), (7), (8), (9) выполнен термомеханический расчет стальной пластины при нагреве в трехзонной методической печи. Исходные данные для расчета аналогичны приведенным выше при задании трехступенчатого режима. В соответствии с действующей технологией, $T_n^k = 1463$ К; $\Delta T = 25$ К. Расчеты показали, что в начальной стадии нагрева зона упругопластических деформаций развивается от тепловосприимчивости

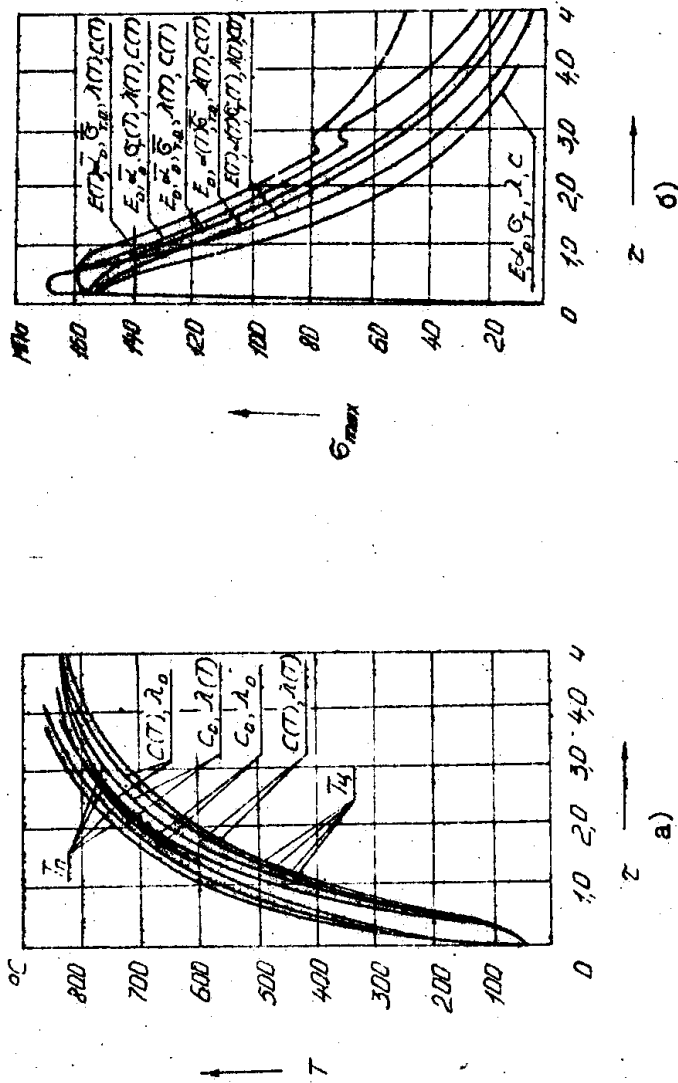


Рис. 2. Динамика температур (а) и температурных напряжений (б) при нагреве термомассивной пластины

мающей поверхности к центру пластины. Затем (приблизительно через 10...15 мин) происходит развитие зон от периферии к центру и от центра к периферии. Таким образом, зона упругих деформаций по мере проявления пластических деформаций уменьшается. Вместе с тем, к моменту окончания процесса нагрева зона упругопластических деформаций не охватывает всего поперечного сечения пластины, что, в свою очередь, может привести к порывам плоских слитков и заготовок при последующей прокатке их на обжимных и листовых станах, а также к прогибам и короблению металла при нагреве.

Основной итог четвертой главы сводится к следующему. Применен новый подход к математическому моделированию процессов теплообмена, протекающих при нагреве "термически массивных" пластин и цилиндров в металлургических печах:

- математические модели базируются на нелинейных задачах теплообмена и описываются сложными математическими зависимостями (например, в случае нагрева массивных круговых цилиндров);
- постановки несвязанных задач теории нагрева пластин и цилиндров выполнены в рамках классической теории термоупругопластичности и в случае, когда физико-механические свойства тел зависят от температуры.

Впервые в теории нагрева приведен комплексный анализ влияния термофизических и физико-механических нелинейностей на динамику температурных полей и температурных напряжений. Основные результаты четвертой главы опубликованы в работах /12,15,19,21, 23,24,27,28 и др./.

5. Теоретические основы и способы расчетов режимов затвердевания, охлаждения и нагрева слитков и заготовок. Применение численных методов в решениях технологических задач затвердевания, охлаждения и нагрева позволяет учесть многие существенные особенности изучаемого явления. Вместе с тем, последние, наряду с очевидными достоинствами, имеют и ряд недостатков. Во многих случаях высокая точность расчета, достигаемая с применением численных методов и ЭВМ, не является необходимой, и исследователю (либо технологу) достаточно выполнить упрощенный расчет для оценки продолжительности затвердевания, охлаждения либо нагрева.

5.1. Затвердевание и охлаждение слитка (отливки). Решение известной задачи выполнено методом Лейбензона-Вейника для трех

стадий затвердевания: I стадия - от начала охлаждения до момента достижения на поверхности слитка температуры солидус; II стадия - от конца стадии I до момента достижения фронтом затвердевания $\tau = \delta$ оси слитка; III стадия - от конца стадии II до момента снижения температуры на оси слитка до температуры солидус с учетом стабилизированного характера охлаждения слитка.

Основные расчетные соотношения затвердевания слитка в форме цилиндра при задании на границе теплообмена закона Ньютона приведены в работе /14/. Далее при использовании решений /38/ разработан способ расчета охлаждения стального слитка после разливки с целью установления продолжительности его полного затвердевания. Показано (рис.3), что в конкретном случае (алюминговый слиток) имеет место удовлетворительное согласование расчетных и измеренных температур и времени его полного затвердевания.

5.2. Нагрев слитков и заготовок в металлургических печах.

Разработаны методики расчетов нагрева стали. Методики применимы, в первую очередь, для тех видов нагревательных печей, в которых металл располагается с зазором (нагревательные колодцы, печи с механизированным подвижным подом; кольцевые, с шагающими балками, с шагающим подом и др.).

Решены задачи о нагреве сплошного кругового цилиндра, пластины, неограниченной призмы и призмы, ограниченной по высоте.

Решения задач о нагреве пластин, цилиндров и призм выполнены методом интегральных преобразований.

Анализ серии решений приведен в книге /2/, и даны методики расчетов нагрева металла, настроенные по результатам промышленных экспериментов. Согласование результатов расчетов и экспериментов удовлетворительное и составляет 1...2%. Приведены примеры теплотехнических расчетов нагрева слитков, в том числе слитков горячего посада при $T_{\text{пов}} = 1123 \text{ K}, 1173 \text{ K}, 1223 \text{ K}$. Показаны возможности и диапазоны применения расчетных методик для анализа режимов нагрева стали.

5.3. Нагрев термически массивных тел конвекцией и излучением одновременно.

Автором диссертационной работы в последние годы уделено значительное внимание разработке и усовершенствованию методов расчета металлургических печей, которые базируются на решениях нелинейных задач теории нагрева.

Решения выполнены в соответствии с инженерной интерпретаци-

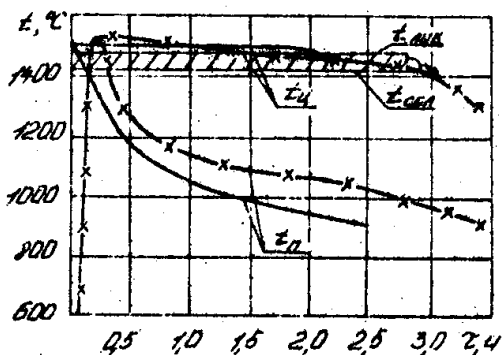
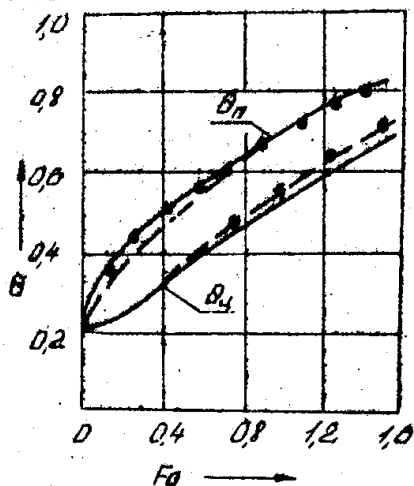
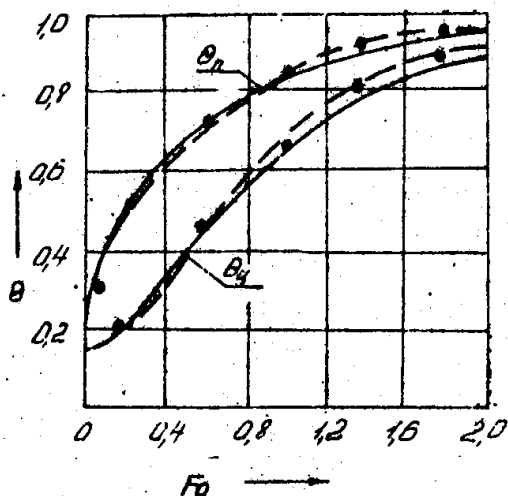


Рис.3. Сравнение расчетных (—) и экспериментальных /17/ (—x—) термограмм при затвердевании слитка осевой стали с поперечным сечением 0,736 x 0,655 м



а) Изменение относительных температур поверхности θ_n и центра θ_c пластины: $B\lambda/Sk=10$
 $\epsilon_c = \epsilon_\lambda = 0$; $\theta_0 = 0,15$; $Sk = 0,5$

б) Изменение относительных температур поверхности θ_n и центра θ_c цилиндра: $B\lambda = 0,05$; $Sk = 0,3$;
 $\epsilon_c = 1,35$; $\epsilon_\lambda = 0,49$; $\theta_0 = 0,196$

Рис.4. Сопоставление расчетных данных по нагреву плиты (а) и цилиндра (б), полученных различными методами: — численное решение; - - - метод эквивалентных источников; . . . метод /13/

ей процесса распространения теплоты, когда имеют место инерционный и регулярный (упорядоченный) этапы.

В качестве математических при решении многочисленных задач применены методы эквивалентных источников и уточненного регулярного этапа. Решения тестированы по результатам численных решений опорной задачи и по результатам промышленных экспериментов, проведенных для условий тепловой работы металлургических печей: кольцевых с вращающимся подом, методических толкательного типа и с механизированным подвижным подом, функционирующих в условиях Днепровского металлургического комбината, Белорусского металлургического завода, Новосибирского завода специальных сталей и сплавов.

Результаты вычислений, численных экспериментов обобщены в виде таблиц, графиков и номограмм и, таким образом, доведены до методик расчетов металлургических печей описанной конструкции.

Автором выполнен анализ полученных решений (рис.4 а, б).

Помимо тестовых расчетов выполнено обобщение решений, уточняющее их возможности для областей чисел B_i и S_k , а также отношения этих чисел B_i/S_k . Установлено, например, что значения чисел Старка ограничиваются пределами $S_k \ll 1,0$, и, таким образом, разработанные методики позволяют исследовать реальные режимы нагрева существующего сортамента металла, размеров слитков и заготовок.

Теория, разработанная автором, по существу вопроса изложена в публикациях /1,2,3,7,13,20 и др./ и, таким образом, широко апробирована.

6. Обоснование и внедрения ресурсосберегающих режимов тепловой обработки металла.

6.1. Промышленное опробование и внедрения режимов нагрева слитков горячего посада. При использовании экспериментального и теоретического материала предыдущих глав автором разработаны и внедрены в производство ресурсосберегающие режимы затвердевания, охлаждения и нагрева стали.

В частности, реализован режим нагрева слитков горячего посада на регенеративных колодцах блюминга "1150" комбината им. Ф.Э.Дзержинского с дифференцированной подачей природного газа. Обобщены данные по нагреву слитков горячего посада, полученные в результате проведения численных расчетов на ЭВМ.

Выполнены технико-экономические анализы режимов нагрева слитков горячего посада за календарные годы их применения.

Расчетом экономической эффективности подтверждено снижение удельного расхода и стоимости топлива за счет изменения его состава. Производственные результаты использования режима нагрева показали улучшение качества прокатанных слитков.

6.2. Разработка рациональных режимов нагрева металла в методических печах толкательного типа. Поиск рациональных режимов нагрева blooms и slabs в методических печах осуществлен численным экспериментом на ЭВМ. Продемонстрирован дифференцированный подход при разработке рациональных температурных и тепловых режимов нагрева стали и сплавов. В конкретном случае направления исследований выбраны с целью повышения показателей качества металлопроката. Установлены закономерности при нагреве сталей и сплавов из специальных сталей в методических печах трубозаготовочного стана 900/750 комбината им.Ф.Э.Дзержинского и стана 810 Новосибирского завода специальных сталей и сплавов. Причем, в последнем случае упор сделан на чередование промышленных и численных экспериментов*. Выполнены трудоемкие предварительные исследования, способствующие внедрению эффективных режимов нагрева металла в методических печах различного конструктивного оформления и функционирующих в линиях прокатных станов различного назначения.

6.3. Разработка технологии нагрева металла в кольцевых печах. Автором, в соответствии с особенностями эксплуатации кольцевых печей, на примере осепрокатного производства продемонстрированы приемы разработки режимов нагрева металла. Причем, как отмечено во второй главе, несмотря на то обстоятельство, что осевая сталь близка по химическому составу стали 45, использовать рекомендации, имеющие место в технической литературе (Н.Д.Тайца, В.Н.Григорьева и др.исследователей), не представляется возможным. Режимы нагрева сплошных круговых цилиндров $\varnothing \varnothing 0,23...0,24$ м (заготовка вагонной оси), $\varnothing \varnothing 0,27...0,28$ м (заготовка локомотивной оси) и длиной 1,9...2,0 м $\varnothing \varnothing 0,29...$

* Принимали участие работники Новосибирского металлургического завода им.Кузмина Р.Н.Муниров, А.К.Мysin и к.т.н. Э.А.Гурвич.

...0, м, длиной 0,89...0,91 м (заготовка полой оси) подбирались методом численного эксперимента по результатам числовых распечаток с ЭЦМ и персональной ЭВМ. Наряду с методом численного поиска рационального режима нагрева осевой стали применен метод из теории оптимального управления.

6.4. Разработка технологии нагрева с использованием методов теории оптимального управления. В конкретном случае исследованы варианты нагрева металла с учетом технологических ограничений.

В качестве технологических ограничений в конкретном случае обоснованно выбраны упруго-пластические температурные напряжения. А поскольку при нагреве наиболее опасны растягивающие напряжения, запишем: $\sigma_x \leq \sigma_g$; $\sigma_z \leq \sigma_g$; $\sigma_\theta \leq \sigma_g$. Требуется за минимальное время перевести цилиндр из начального температурного состояния T_0 в конечное: $T(z; \tau) = T_{c1} < T_k < T_{c2}$ с учетом σ_g .

Задача оптимизации формулируется следующим образом: необходимо выбрать режим изменения температуры среды, который удовлетворяет введенным ограничениям, причем, чтобы функционал

$$I = \int_0^{\tau^2} \int_0^2 (T(z, \tau) - T_k)^2 d\tau dz \quad (15)$$

был бы минимальным: $I = I_{min}$, где $T(z, \tau)$ - решение исходной температурной задачи.

В качестве математического аппарата впервые применен разработанный в Белорусском политехническом институте метод магистральной асимптотической оптимизации*.

В результате применения методов численного эксперимента, магистральной асимптотической оптимизации, подкрепленных данными промышленных и лабораторных экспериментов, автором разработана технология тепловой обработки стали при нагреве в кольцевых печах осепрокатного стана 250.

* Ковалевский В.Б. Методы и алгоритмы асимптотической оптимизации систем с распределенными параметрами и их приложение к задачам технологии нагрева металла. Автореф. канд. дис.: 01.01.11; 05.16.08. - Минск, 1988. - 16 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведено 13 основных выводов по комплексу проведенных автором исследований, которые в автореферате сведены к основным.

1. Диссертационная работа направлена на решение крупной научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение. В ней, в частности, разработаны теоретические основы режимов за- твердевания, охлаждения и нагрева слитков и заготовок, а также ресурсосберегающие технологические процессы при тепловой обработке стали.

Многие теоретические разработки и методики расчетного анализа нашли применение в условиях крупных металлургических предприятий и первого в Белорусской ССР металлургического мини-завода (г. Жлобин), построенного по проекту ведущих фирм Европы.

2. Автором диссертационной работы применен комплексный (системный) подход. Главное внимание уделено внутреннему теплопоглощению металлом, детальное изучение которого сопровождается точным расчетом температурных полей, температурных деформаций и напряжений.

При этом использованы современные методы термического анализа: термометрирование слитка и заготовки на технологических этапах от разливки до выдачи на прокат в нагревательных и термических печах различных конструкций, которые нашли широкое применение не только в СССР, но и успешно функционируют в условиях металлургических производств передовых, экономически развитых стран (Япония, США, Италия, Германия, Австрия и др.); физико-математическое моделирование нелинейных задач охлаждения и нагрева стальных слитков; методы математической физики и термомеханики; современный арсенал знаний в области теории и технологии металлургического производства.

3. Впервые в теории за- твердевания стального слитка проведен анализ его термонапряженного состояния при вычислениях термоэластоупругопластических деформаций и напряжений. При анализе термонапряженного состояния слитка введен новый параметр $K_{\sigma} = (\sigma_p - \sigma_n) / \sigma_n$, с помощью которого представляется возможным расчетом "предупредить" нарушение сплошности слитка либо заготовки в процессе охлаждения и нагрева.

4. Выявлены закономерности совмещенного теплотехнологичес-

кого процесса "разливка - охлаждение - нагрев".

Построены номограммы прохождения слитком в "совмещенном" процессе, позволяющие производить оперативные расчеты технологических и теплотехнических параметров слитка и нагревательной ячейки.

5. В теории нагрева массивных тел получены новые закономерности:

- впервые проведен комплексный анализ влияния теплофизических и физико-механических нелинейностей на динамику температурных напряжений и, как следствие, на динамику температурных полей при нагреве (охлаждении) массивных тел;

- результаты численных экспериментов автора отличаются от известных широкому кругу специалистов решений, например, Н.Ю.Тайца, Ю.А.Самойловича, Ю.С.Постольника и других исследователей о формировании зон упругих и упругопластических деформаций по сечению слитков и заготовок в ходе продолжительного нагрева.

6. Разработаны инженерные способы расчетов задач затвердевания, охлаждения и нагрева слитков и заготовок, которые отличаются от известных повышенной точностью и простотой итоговых расчетных соотношений (глава 5).

Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что разработанные автором методики расчетов достаточно надежны и могут быть рекомендованы к более широкому применению.

7. В соответствии с изложенной в главах 3...5 теорией, а также с учетом экспериментальных результатов, приведенных во второй главе, автором разработаны ресурсосберегающие режимы тепловой обработки слитков и заготовок.

Внедрена технология на металлургических агрегатах Днепровского металлургического комбината им.Ф.Э.Дзержинского, Белорусского металлургического завода и Новосибирского завода специальных сталей и сплавов им.Кузьмина.

8. Внедрение режимов тепловой обработки позволило улучшить технико-экономические показатели:

- на нагревательных колодцах блюминга "1150" снижены расход природного газа на $1,8 \text{ м}^3/\text{т}$ годного проката и средняя стоимость 1 т условного топлива на 0.17 рублей;

- на методических печах толкательного типа среднесортного проката имеет место увеличение коэффициента полезного действия

$\eta_{\text{кпд}}$ на 2,28%, удельный расход топлива снизился на 7 и 12 кг у.т./т, окисинообразование уменьшилось на 18,5 и 13,6% соответственно для печей различного конструктивного оформления;

- при нагреве специальных сталей и сплавов выход годного металлопроката увеличился на 60%, удельный расход топлива уменьшился на 3,2 кг у.т./т;

- для кольцевых печей с механизированным вращающимся подом стана 250 удельный расход топлива уменьшился на 13,5 и 6,3 кг у.т./т, окисинообразование уменьшилось на 4,8 и 2,0 кг/т (печь № 1) в зависимости от состояния подины; для печи № 2 удельный расход топлива снизился на 5 кг у.т./т, а окисинообразование - на 1 кг/т.

9. Экономический эффект от внедрения разработок автора в условиях функционирующих металлургических агрегатов составил около 2,0 млн.рублей.

Основное содержание диссертации изложено в публикациях:

Книги:

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки (уч.пос.)/А.П.Несенчук, В.Г.Лисиенко, В.И.Тимошпольский и др. - Мн.:Высшэйш.шк., 1988.-240 с.
2. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. Нагрев стали (Справочное пособие). - Мн.:Высшэйш.шк., 1990.-С.315.
3. Прикладные задачи металлургической теплофизики/В.И.Тимошпольский, Н.М.Беляев, А.А.Рядно и др.-Мн.:Наука и техника, 1991.-319 с.

Статьи:

4. Усовершенствование режима нагрева осевых заготовок в кольцевой печи/Э.М.Гольдфарб, В.И.Тимошпольский, Ю.С.Постольник и др. // Сталь.-1978.-№ 9.-С.866-868.
5. Экономия топлива при оптимизации технологических режимов нагрева слитков и заготовок/А.В.Печерица, И.Д.Конов, В.И.Тимошпольский и др. // Сталь.-1979.-№ 2.-С.151-153.
6. Охлаждение катаных вагонных осей перед термической обработкой/В.И.Тимошпольский, Ю.С.Постольник, А.П.Сичевой и др. // Сталь.-1979.-№ 2.-С.154-156.
7. Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И., Сичевой А.П. Анализ технологии нагрева металла в пламенных печах // Изв.вузов. Черн. металлургия.-1979.-№ 2.-С.110-113.

8. Исследование температур, напряжений и деформаций при несимметричном радиационно-конвективном нагреве изделий плоской формы/М.А.Геллер, А.А.Парнас, В.И.Тимошпольский и др. // ИФЖ.-1984.-Т.46.-№ 3.-С.481-485.
9. Тимошпольский В.И. Уточнение для расчетов методических печей // Изв.вузов.Черн.металлургия.-1984.-№ 6.-С.157-158.
10. Тимошпольский В.И., Сичевой А.П. Режимы нагрева и термообработки при производстве железнодорожных осей // Сталь.-1984.-№ 12.-С.65-67.
11. Тимошпольский В.И. Расчетные формулы теплового процесса в толстостенной трубе // Изв.вузов.Черн.металлургия.-1985.-№ 7.-С.172-173.
12. Тимошпольский В.И., Чернявский Ю.Е. Расчет упругопластических напряжений и деформаций применительно к нагреву массивных металлических изделий // Изв.вузов.Черн.металлургия.-1985.-№ 10.-С.154.
13. Тимошпольский В.И. Инженерный способ расчета массивных тел в условиях лучистого теплообмена // Изв.вузов.Черн.металлургия.-1986.-№ 7.-С.124-127.
14. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. Расчеты затвердевания отливок цилиндрической формы по методу Лейбзонна // ИФЖ.-1987.-Т.52.-№ 3.-С.485-490.
15. Пластическая деформация в процессе тепловой обработки заготовок из осевой стали/А.В.Степаненко, В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова и др. // В кн.:Металлургия.-Мн.:Высш.шк., 1987.-Вып.21.-С.3-6.
16. Усовершенствование технологи. термической обработки катаных осей железнодорожного транспорта/В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова, А.П.Сичевой и др. // Изв.вузов.Черн.металлургия.-1987.-№ 8.-С.89-92.
17. Затвердевание и охлаждение осевого слитка в чугунной явложнице/В.И.Тимошпольский, Э.А.Гурвич, А.К.Голубченко и др. // Сб.:Металлургическая и горнорудная промышленность.-1987.-№ 3.-С.33-36.
18. Теплофизический анализ процессов затвердевания, охлаждения и нагрева слитков (отливок)/В.И.Тимошпольский, Э.А.Гурвич, И.А.Трусова, Н.Л.Мандель // ИФЖ.-1988.-Т.54.-№ 4.-С.648-654.
19. Управление режимом нагрева массивного цилиндра с учетом ог-

- раничений на упругоэластические температурные напряжения/ В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова, В.Б.Ковалевский и др. // Изв.вузов. Энергетика.-1987.-№ 9.-С.81-86.
20. Анализ и возможности применения приближенного аналитического метода в расчетах технологии нагрева стали/А.В.Степаненко, В.И.Тимошпольский, Д.Г.Седяко, М.Г.Тихоновский // Изв.вузов. Энергетика.-1988.-№ 4.-С.77-81.
21. Многокритериальная оптимизация режимов нагрева листовых слитков в проходных печах/В.И.Тимошпольский, П.В.Севастьянов, Н.Л.Мандель и др. // Изв.вузов. Энергетика.-1988.-№ 7.-С.80-85.
22. Математическое моделирование тепловых и термомодеформационных явлений в совмещенном технологическом процессе "затвердевание в изложнице - нагрев"/В.И.Тимошпольский, П.В.Севастьянов, В.А.Пумпур и др. // Изв.АН БССР. Серия физико-технических наук.-1989.-№ 1.-С.62-66.
23. Экономичные режимы кольцевых печей осепрокатного стана 250/ В.И.Тимошпольский, И.С.Тимошпольский, В.П.Виниченко и др. // Сталь.-1989.-№ 2.-С.99-103.
24. Тепловая работа проходной печи мелкосортного стана БМЗ/ Ю.А.Самойлович, Д.Г.Седяко, Ю.А.Малевиц, В.И.Тимошпольский и др. // Сталь.-1989.-№ 4.-С.101-105.
25. Закономерности нагрева слитков горячего передела/И.С.Тимошпольский, В.И.Тимошпольский, Б.Ф.Шендрик, П.В.Севастьянов и др. // Сталь.-1989.-№ 9.-С.97-100.
26. Теплотехнический анализ режимов нагрева и охлаждения стали в совмещенном процессе/В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова, Н.Л.Мандель и др. // Изв.вузов. Энергетика.-1990.-№ 3.-С.94-98.
27. Теплотехнический анализ работы нагревательных печей/В.И.Тимошпольский, Э.А.Гурвич, Н.Л.Мандель и др. // Изв.вузов. Энергетика.-1990.-№ 9.-С.91-96.
28. Дымова Л.Г., Севастьянов П.В., Тимошпольский В.И. Сравнительный анализ математических моделей формирования термических напряжений и деформаций в затвердевающем слитке // ИФЖ.-1991.-Т.60.-№ 1.-С.115-120.

Научные конференции

29. Тимошпольский В.И., Мильман Е.А., Калужный И.Ф. Экономия ме-

- таля и топлива в осепрокатном производстве // В кн.: Теоретические проблемы прокатного производства. III Всесоюзн. конф. - Октябрь 1980. - Днепропетровск, 1980. - С. 307-308.
30. Усовершенствование технологии нагрева осевой заготовки в печах с вращающимся подом / В.И. Тимошпольский, А.П. Сичевой, В.П. Виниченко, Е.А. Мильман // В кн.: Повышение технического уровня нагревательных устройств в прокатном производстве. - Всесоюзн. совещание. - Апрель 1987: Тезисы доклада. - М.: ВДНХ СССР, 1987. - С. 35.
31. Опыт разработки технологии нагрева металла в методических печах на металлургическом комбинате им. Ф.Э. Дзержинского / И.С. Тимошпольский, Э.С. Саладинский, В.А. Данько, В.И. Тимошпольский и др. // Всесоюзн. науч.-техн. совещание "Повышение технического уровня нагревательных устройств в прокатном производстве. - Апрель 1987: Тезисы доклада. - М.: ВДНХ СССР, 1987. - С. 30.
32. Разработка и усовершенствование технологии нагрева стали в условиях крупного металлургического комбината / В.И. Тимошпольский, Э.А. Гурвич, И.А. Трусова, Н.Л. Мандель // В кн.: Энергооберегающие технологии и теплоэнергетические проблемы оптимизации печного хозяйства металлургических предприятий. Всесоюзн. науч.-техн. конф. 19-22 мая 1987 г.: Тезисы докл. для служ. польз. - Миасс, Челябинской обл., 1987. - С. 25.
33. Тимошпольский В.И., Севастьянов П.В. Математическое моделирование тепловых и термоупругопластических явлений в совмещенном технологическом процессе "затвердевание - охлаждение - нагрев" листовых слитков // В кн.: Применение ЭВМ в управлении химико-металлургическими процессами. - Сб. тезисов докладов Всесоюзн. науч.-техн. конф. - Свердловск, 1987. - С. 44.
34. Тимошпольский В.И., Тимошпольский И.С., Гурвич Э.А. Пути интенсификации тепловой работы нагревательных колодцев и методических печей толкательного типа // В кн.: Теория и практика тепловой работы металлургических печей. Республ. конф. - Октябрь 1988: Тезисы доклада. - Днепропетровск, 1988. - С. 113.
35. Теплотехнология на объектах осепрокатного производства / В.И. Тимошпольский, Э.А. Гурвич, И.А. Трусова, Н.Л. Мандель // В кн.: Научна сесия ВМЭИ "Ленин" 89. - Октябрь 1989: Тезисы доклада. - София: НРБ, 1989. - С. 27.

36. Тимошпольский В.И., Гурвич Э.А., Мандель Н.Л. Энергосберегающие совмещенные металлургические процессы // В кн.: Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии. Респ. конф. - Октябрь 1989. - Днепропетровск, 1989. - С. 33.
37. Дифференцированная подача высококалорийного топлива при нагреве слитков горячего посада / В.И. Тимошпольский, Э.А. Гурвич, И.С. Тимошпольский и др. // В кн.: Теплотехническое обеспечение процессов металлургии. Всесоюз. конф. - Май 1990. - Свердловск, 1990. - С. 66-67.
38. Continuous casting - hot charge rolling as a basis for energy saving intensification / Maslennikoff A.V., Stebloff A.B., Stepanenko A.V., Timoshpol'skiy V.I. // Proceedings of the 5th international continuous casting conference, June 18-20, 1990, Linz/Austria, P. 16/1-16/5.

Изобретения

39. Способ нагрева слитков в колодцах / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.С. Тимошпольский и др. / А.с. СССР № 1381179.
40. Способ нагрева заготовок вагонных осей в пламенной кольцевой печи под прокатку / А.В. Степаненко, В.И. Тимошпольский, В.А. Хлебцевич и др. - Положительное решение к заявке № 4066699/02 от 16.06.1987 г.
41. Способ термической обработки горячекатаных осей / А.В. Степаненко, В.И. Тимошпольский, В.А. Хлебцевич и др. - Положительное решение № 4066698/02 от 25.05.1987 г.

В.И. Тимошпольский