

На правах рукописи

Баранкова Инна Ильинична

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ
ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ МЕТИЗНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.09.10 Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина).

Научный консультант -

доктор технических наук, профессор Демидович Виктор Болеславович

Официальные оппоненты -

доктор технических наук, профессор Гончаров Вадим Дмитриевич

доктор технических наук, профессор Кувалдин Александр Борисович

доктор технических наук, профессор Фролов Владимир Яковлевич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты (ФГУП ВНИИТВЧ) (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится " ____ " _____ 2010 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан " ____ " _____ 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент

М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях задачами отечественной экономики являются внедрение инновационных технологий, использование которых приводит к повышению качества готовой продукции, снижению энергоемкости, металлоемкости, повышению производительности труда, уменьшению отрицательного влияния производства на окружающую среду.

Метизное производство является, в основном, завершающим переделом черной и цветной металлургии. Отставание от передовых технологий не даст возможности производителям переходить на современные виды крепежа и будет способствовать увеличению импорта не только высокотехнологичных крепежных изделий, но и высококачественного крепежа традиционного ассортимента. Результат — невысокая финансовая эффективность инвестиций в данный сектор производства, высокая вероятность товарной интервенции.

Применение индукционного способа нагрева для термообработки продукции метизной отрасли позволит повысить качество получаемой продукции, сформировать требуемую структуру металла при одновременном сокращении расхода электроэнергии.

Постоянно расширяющееся многообразие технологий, в которых применяется индукционный нагрев, определяет многообразие форм и видов индукторов, функциональный, мощностной и частотный диапазон индукционного оборудования. В связи с большим разнообразием продукции в метизном производстве в технологических цепочках существуют различные схемы термообработки, поэтому номенклатура используемого нагревательного оборудования достаточно обширна. Средствами нагрева и охлаждения, как в нагревательных, так и в термических печах могут быть продукты сгорания, радиационные трубы, электронагреватели, индукционные нагреватели.

В черной и цветной металлургии есть области, где индукционный нагрев не нашел широкого применения. Это термообработка стальной проволоки и калиброванной стали, нагрев рулонов ленты. Существующее современное электротермическое оборудование, применяемое под термообработку листового проката и калиброванной стали в бунтах, — это, в основном, колпаковые электропечи сопротивления косвенного действия. Они позволяют обеспечить требуемое качество металла при широком варьировании типоразмеров загрузки, температур и назначений термообработки. Однако они имеют низкую производительность и ограниченные резервы в сокращении длительности нагрева за счет интенсификации внешнего теплообмена (не более 10-15%).

В работе рассматриваются особенности применения индукционного способа нагрева в метизной промышленности для ранее не используемого класса объектов, таких как мотки проволоки и бунты калиброванной стали, рулоны металлической ленты.

Для формирования определенной структуры металла часто необходимо сочетание скоростного индукционного нагрева с возможностью реализации технологической выдержки. Поэтому кардинальное решение задачи следует искать в сохранении достоинств термообработки в колпаковых печах, но с теплогенерацией внутри нагреваемой загрузки. В этом случае необходимо применение индукционных установок периодического действия.

Многие высоколегированные стали, поставляемые для дальнейшей переработки и потребления в виде проволоки и прутков при холодной деформации значительно упрочняются и после одной протяжки с обжатием 20 – 30 % теряют вязкость и приобретают склонность к поверхностному трещинообразованию. Для того, чтобы осуществить дальнейшее волочение такой проволоки необходимо ее отжигать после каждой холодной протяжки.

Эффективным средством снижения количества промежуточных отжигов является подогрев проволоки до определенных температур перед ее волочением (до 300 – 450 °С), т.е. применение теплого волочения, в результате которого наклеп проволоки значительно уменьшается или даже полностью отсутствует.

Проволочные станы часто состоят из реверсивной черновой клетки и непрерывной группы. Заготовка входит в непрерывную группу с очень низкой скоростью – 0,5 – 1 м/с. В результате конец заготовки остывает настолько, что условия прокатки его значительно отличается от головной части. Перепад температур между головным и хвостовым участками может достигать 300 °С. Снижение температуры металла в процессе прокатки создает определенные проблемы.

Промежуточный индукционный нагрев поддерживает температуру заготовки постоянной на входе в чистовую группу стана, что позволяет увеличить массу бунта, повысить производительность, снижает износ калибров валков, позволяет снизить температуру печи и окисление границ зерен металла, достичь более жестких допусков по сечению металла.

Цель работы. Расширение области применения индукционного нагрева для термообработки продукции метизной отрасли. Исследование влияния индукционного способа нагрева на скорость, качество нагрева стальной проволоки в бунтах и удельные энергозатраты. Изучение процессов, происходящих при индукционном нагреве стальной проволоки в бунтах, рулонов ленты – тел, обладающих физически неоднородной структурой. Исследование эффективности применения индукционного нагрева проволоки, нити которой объединены в пучок.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Определение области эффективного применения энергосберегающих технологий индукционного нагрева в метизной промышленности
2. Исследование влияния индукционного способа нагрева на температурно-временные факторы при формировании структуры, на повышение равномерности нагрева и качество термообработки

проволоки, калиброванной стали в бунтах с учетом поставленной технологической задачи.

3. Составление обобщенных и проблемно-ориентированных моделей, учитывающих все основные закономерности, присущие индукционному нагреву бунтов калиброванной стали.
4. Разработка энергоэффективных технологических режимов термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали с применением индукционного способа нагрева. Проведение анализа энергетического эффекта, получаемого от совершенствования конструкции индукционных нагревателей для термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали и режимов их работы.
5. Оценка эффективности применения средне и высокочастотного индукционного нагрева как одной нити, так и пучка из нескольких нитей стальной проволоки.

Методы исследования. Исследования электромагнитных и тепловых процессов систем индукционного нагрева проводились с помощью компьютерного моделирования методами математической физики и вычислительной математики. Разработанные математические модели базируются на методах: теории вероятностей и математической статистики, использовании методов теории гидродинамики, методов решения интегральных уравнений, методов конечных разностей и их комбинациях. Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях с использованием разработанных методик.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием апробированных математических и численных методов, также экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов.

Справедливость выводов относительно адекватности используемых математических моделей, достоверности, работоспособности и эффективности предложенных режимов и конструкций подтверждена результатами математического моделирования и промышленными экспериментами.

Научная новизна работы определяется тем, что она расширяет и углубляет теоретические представления об общих закономерностях протекания физических процессов при индукционном нагреве для ранее не используемого класса объектов. В работе получены следующие основные научные результаты:

1. Исследовано применение индукционного нагрева в метизной промышленности для ранее не используемого класса объектов, таких как бунты калиброванной стали и рулоны металлической ленты. Исследовано влияние способа нагрева на продолжительность термообработки указанных объектов, энергозатраты, на получение требуемой структуры металла.

2. Оценено влияние на скорость и равномерность нагрева вынужденной конвекции, возникающей при вибрации витков проволоки в электромагнитном поле. Выявлены качественные и количественные закономерности процессов внутреннего теплопереноса с относительным движением витков металлической проволоки и воздуха.
3. Разработана комплексная математическая модель для расчета распределения электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве системы тел, обладающих неоднородностью электро- и теплофизических свойств по сечению и объему.
4. Разработана имитационная модель для определения электро- и теплофизических характеристик объектов нагрева, являющихся случайными величинами с нормальным распределением.
5. Исследована эффективность применения индукционного нагрева проволоки, нити которой объединены в пучок. Определена эффективная частота тока при индукционном нагреве пучка проволоки в зависимости от количества нитей и диаметра проволоки.

Практическая ценность работы. Обоснованы теоретически и проверены экспериментально в промышленных условиях преимущества применения индукционного способа нагрева в тех областях металлургической промышленности, где он не нашел широкого применения: отжиг стальной проволоки в мотках, нагрев рулонов ленты. Применение индукционного способа нагрева позволяет сократить расход электроэнергии и повысить качество обработки металла. Разработанные математические модели позволяют решать комплексные задачи исследования электротепловых, термогидродинамических процессов для разработки конструкций и режимов работы индукционных установок. Результаты исследования применены для разработки технологических режимов индукционной термообработки калиброванной стали в бунтах и совершенствования конструкции индукционных нагревателей для термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали и режимов их работы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование эффективности применения индукционного нагрева в метизной промышленности для ранее не используемого класса объектов
2. Комплексная математическая модель для расчета распределения электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве тел, обладающих неоднородностью электро- и теплофизических свойств по сечению и объему, учитывающая взаимное влияние различных процессов.
3. Технологические режимы термообработки калиброванной стали в бунтах и конструкции индукционных нагревателей для термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали, режимов их работы.

4. Имитационная модель для определения электро- и теплофизических характеристик объектов нагрева, являющихся случайными величинами с нормальным распределением.
5. Обоснование эффективности нагрева проволоки, нити которой объединены в пучок, определение минимальной частоты, при которой нагрев становится эффективным в зависимости от количества нитей и диаметра проволоки.

Реализация результатов работы. Полученные в работе теоретические закономерности и практические результаты использованы:

- при выполнении фундаментальных НИР в рамках гранта ФЦП № НК-66П Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии»;
- в проектно-конструкторских организациях и предприятиях метизной промышленности;
- вариант конструктивного исполнения индукционной печи для термообработки бунтов калиброванной стали и усовершенствованные режимы отжига бунтов калиброванной стали внедрены на Магнитогорском метизно-калибровочном заводе. Экономия на себестоимости на термообработке и отжиге бунтов составляет 67%.

Теоретические результаты вошли в учебные материалы Всероссийской научной школы для молодежи «Высокоэнергетические методы обработки материалов», проводимой в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). Результаты диссертационной работы нашли применение в учебном процессе ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет» при чтении лекций, в курсовом и дипломном проектировании, а также в магистерском курсе «Численные методы в теории электромагнитной обработки материалов» в СПбГЭТУ(ЛЭТИ).

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Всесоюзной научно-технической конференции «Энергосберегающие технологии и теплоэнергетические проблемы оптимизации печного хозяйства металлургических предприятий» (Миасс, 1987); 11 Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых «Проблемы теплотехники металлургических процессов и агрегатов» (Свердловск, 1988); Всероссийской научно-технической конференции «Энергетики и металлурги настоящему и будущему России» (Магнитогорск 1998); Международной научно-технической конференции «Экологические проблемы промышленных зон Урала» (Магнитогорск, 1998); Региональной научно-технической конференции «Новые программные средства для предприятий

Урала» (Магнитогорск 2003г, 2004г.); III Межвузовской. конференции по научному программному обеспечению «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследованиях». (Санкт-Петербург, 2005г.); Всероссийской научно-технической конференции «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации» (Магнитогорск, 2005г.); 6-ой Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование» (Санкт-Петербург, 2005 г.); Второй Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2006.); 7-ой Международной научно-технической конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении» (Харьков, Украина, 2006.); Международной научно-технической конференции «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. (Череповец, 2006); Международном промышленном форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (Челябинск, 2007 г.); Пятой Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт – Петербург, 2008); IV международной научно-практической конференции «Печные агрегаты» (Москва, 2008г.); 2-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» С-Петербург, 20-22 мая 2009 г; Третьей Международной металлургической конференции «МЕТАЛЛУРГИЯ-ИНТЕХЭКО-2010» (Москва, 2010).

Публикации по теме диссертации. По результатам проведенных исследований опубликовано 54 печатные работы, среди которых 7 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых в действующем перечне ВАК, монография, два учебных пособия, авторское свидетельство СССР, свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 191 наименований и одного приложения. Работа изложена на 252 листах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель ее проведения, излагаются основные концепции, лежащие в основе работы и определяющие ее структуру и методы исследования.

В первой главе рассмотрены основные области применения индукционного нагрева в метизной промышленности. Проведенный анализ технологических процессов производства изделий метизной отрасли и используемого нагревательного оборудования показывает, что существует

возможность расширения применения индукционных нагревательных установок в метизной промышленности. Это позволит повысить качество получаемой металлопродукции, обеспечить снижение потребления энергии (рис.1). Выявлены новые области, в которых будет эффективно применение индукционных установок. К ним относятся:

- термообработка стальной проволоки в мотках и калиброванной стали в бунтах
- промежуточный индукционный нагрев при производстве проволоки
- термообработка рулонов стальной ленты,
- подогрев рулонов аварийно снятых перед прокаткой,
- нагрев сыпучих ферромагнитных материалов и контейнеров метизов.

Приведено обоснование возможности применения индукционного способа нагрева для отжига рулонов ленты и бунтов калиброванной стали и целесообразность использования промышленной частоты. Высокая эффективность применения индукционного нагрева для мотков проволоки и бунтов калиброванной стали в промышленных условиях в печах периодического действия при термообработке калиброванного металла в бунтах внешним размером 0,9–1,4 м из низкоуглеродистых, углеродистых и легированных сталей. Приведен сравнительный анализ потребления конечной энергии при индукционном и пламенном нагреве при рекристаллизационном отжиге бунтов проволоки.

Во второй главе рассмотрены влияние увеличения скорости нагрева мотков проволоки в индукционных печах на повышение качества металла после термообработки. На структуру и механические свойства металла после термообработки влияют не только исходная структура металла, степень обжата при деформации, температура и время термообработки, но и скорость нагрева металла до температур обработки.

Влияние скорости нагрева на величину рекристаллизованных зерен проявляется в основном в области температур рекристаллизации 600°C - 720°C, поэтому скорость нагрева приблизительно до 550°C может быть любой, а в области температур 550°C - 720°C не должна превышать 180 °C/час - 250°C/час. На температурно-временные факторы при формировании структуры металла существенное влияние оказывает и способ подвода энергии для процессов превращения.

При прямом электронагреве, когда энергия (теплота) генерируется одновременно в каждом элементе объема и в момент превращения затрачивается на поддержание температуры и на само превращение, создаются благоприятные условия для быстрого и одновременного протекания фазовых превращений по всему объему. Карбиды и другие включения в структуре металла являются местами неоднородностей, создают неравномерную плотность электрического тока по сечению и способствуют усиленному выделению теплоты на границе раздела фаз.

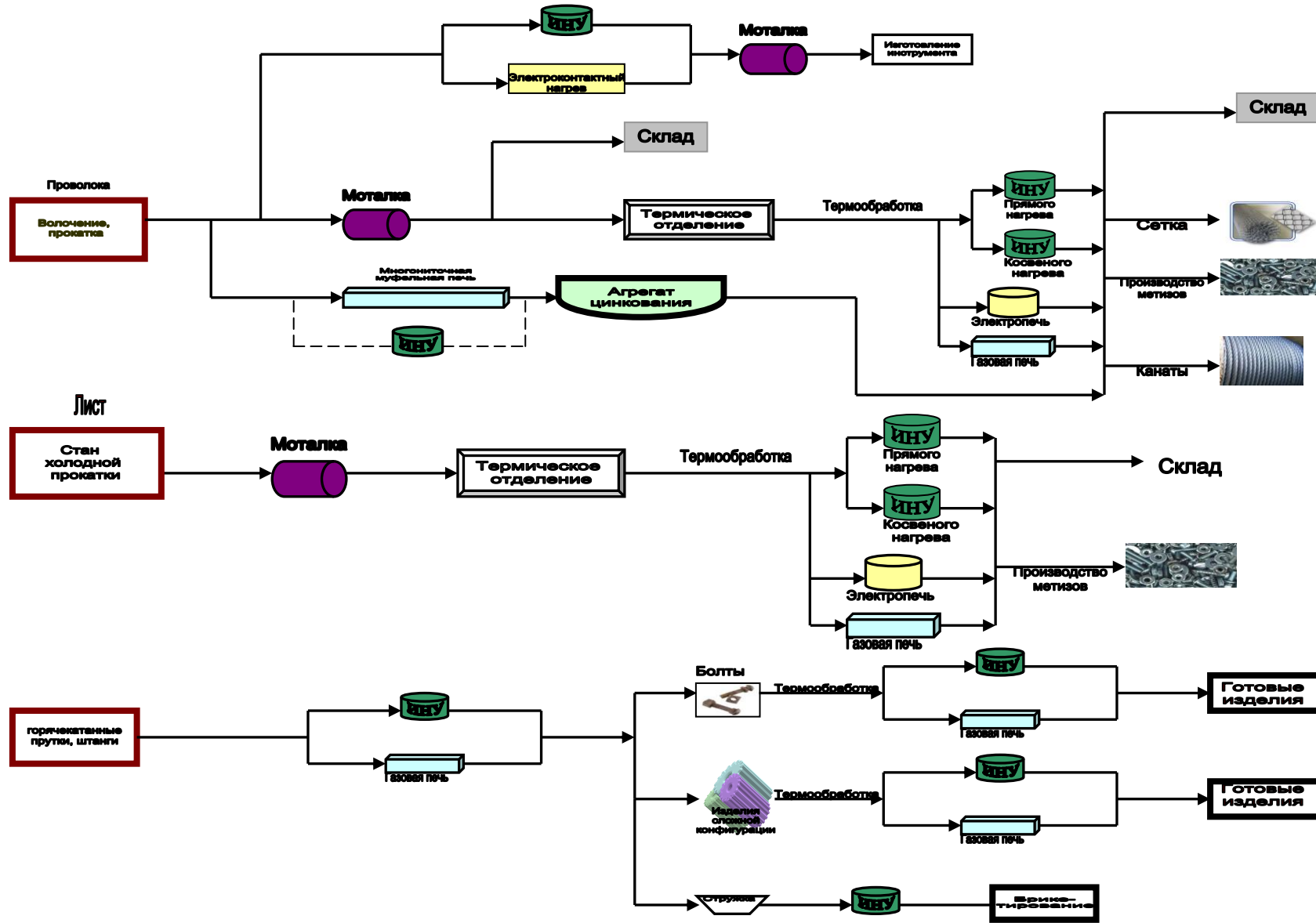


Рис.1. Использование индукционного нагрева в метизной промышленности

В промышленных условиях в индукционной печи было проведено более чем 100 отжигов бунтов калиброванной стали, преимущественно легированной, общей массой до 350 тонн. Всего было исследовано более 1000 образцов из стали марки 38ХГНМ. Проведенные исследования показали, что на формирование структуры проволоки при термообработке оказывает влияние способ и скорость нагрева до температуры начала аустенитного превращения.

Значительное сокращение продолжительности термообработки бунтов проволоки и рулонов металлической ленты возможно за счет увеличения скорости нагрева до температуры A_{c1} . Необходимые скорости нагрева бунтов проволоки и рулонов металлической ленты обеспечивает применение индукционных нагревательных установок.

При термообработке массивных тел время термообработки в значительной мере зависит от скорости достижения металлом заданной температуры по всему объему. При нагреве металлических заготовок выравнивание температуры по объему происходит за счет теплопроводности, но при нагреве мотков проволоки вследствие наличия воздушных промежутков эффективная теплопроводность мотка значительно снижена.

Особенностью нагрева бунтов проволоки и калиброванной стали, вызванной индукционным способом нагрева, относится возникновение вибрации витков проволоки в электромагнитном поле. Вибрация витков приводит к вынужденному движению воздуха, появлению колеблющихся потоков воздуха и увеличению конвективного теплопереноса. При моделировании индукционного нагрева мотков проволоки и бунтов калиброванной стали необходимо дополнительно учитывать теплообмен конвекцией.

При действии внешней силы $p_1(t)$ произвольного вида полное поперечное динамическое перемещение свободного участка витка проволоки имеет вид:

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x_i x_{i1}}{p_i} \int_0^t q_1(t') \sin p_i(t-t') dt',$$

где X_i — нормированные функции, описывающие формы колебаний; x_{i1} — значение нормированной функции x_i в точке приложения силы.

$$q_1 = p_1(t)/m$$

где m масса витка проволоки, отнесенная к единице длины.

Выражение для поперечных перемещений при установившихся вынужденных колебаниях:

$$y = \frac{2pl^3 \sin \omega t}{EI\pi^4} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(i\pi x/l) \sin(i\pi x_1/l)}{i^4 \alpha^2},$$

где α отношение частоты изменения возмущающей силы к частоте основной формы свободных колебаний:

$$\alpha = \omega/p_1 = \omega l^2 / (a\pi^2),$$

EI — жесткость при изгибе, l — длина витка

В горизонтальном направлении на виток действует сила

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_u N_u I_i}{l_u} + \frac{\mu\mu_0}{2\pi} I_i \left(\sum_{j=i}^N \frac{I_j}{(j-1)R/N} - \sum_{j=1}^i \frac{I_j}{(j-1)R/N} \right),$$

где R – толщина бунта,

l – длина витка,

l_u – высота индуктора,

I_u – сила тока в индукторе.

Величина результирующей силы, взаимодействия витков в вертикальном направлении

$$F_3 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \left(\sum_{j=i}^M I_j \sum_{j=1}^M \frac{I_{M-i}}{(j-1)H/M} \right),$$

где H – высота стопы,

M – число витков в стопе по высоте.

Одной из основных особенностей колеблющихся потоков является образование стационарных вихревых течений. В зависимости от толщины колеблющегося пограничного слоя течения могут возникать как вблизи колеблющихся тел, так и в свободном колеблющемся потоке среды. Добавочное вторичное течение на большом расстоянии от тела не зависит от вязкости среды.

В рассматриваемом случае число Прандтля p_r мало, а при $p_r \ll 1$ толщина динамического колеблющегося пограничного слоя меньше толщины теплового пограничного слоя. В этом случае процесс теплообмена осуществляется посредством внешних вторичных течений, термическим сопротивлением динамического вязкого пограничного слоя можно пренебречь.

Критериальное уравнение для теплоотдачи на поверхности цилиндра:

$$N_u = \frac{\alpha r_0}{\lambda} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \left(\frac{\Delta U_\infty^2}{\omega a} \right)^{0.5} \cos \frac{x}{r_0} \quad \text{при } p_r \rightarrow 0,$$

где α — коэффициент теплоотдачи;

λ — коэффициент теплопроводности;

x — координата, направленная вдоль поверхности цилиндра;

r — радиус цилиндра;

$\frac{x}{r_0}$ — угловая координата.

Безразмерный комплекс:

$$\frac{\Delta U_\infty^2 \nu}{\omega a a} = \text{Re}_\nu p_r$$

ΔU_{∞} - амплитуда колебания скорости внешнего потока;

Re_v - критерий Рейнольдса вторичных течений;

В результате теоретических расчетов установлено, что с учетом колебания потоков воздуха величина коэффициента теплоотдачи резко возрастает. На величину коэффициента теплоотдачи в пульсирующем потоке воздуха оказывает влияние диаметр нагреваемой проволоки, амплитуда вибрации и температура. Исследования указанных зависимостей показали, что на величину коэффициента теплоотдачи в пульсирующем потоке воздуха большее влияние оказывает амплитуда вибрации, а не диаметр проволоки.

Зависимость коэффициента теплоотдачи в пульсирующем потоке воздуха от амплитуды вибрации для различных диаметров проволоки приведена на рисунке 2.

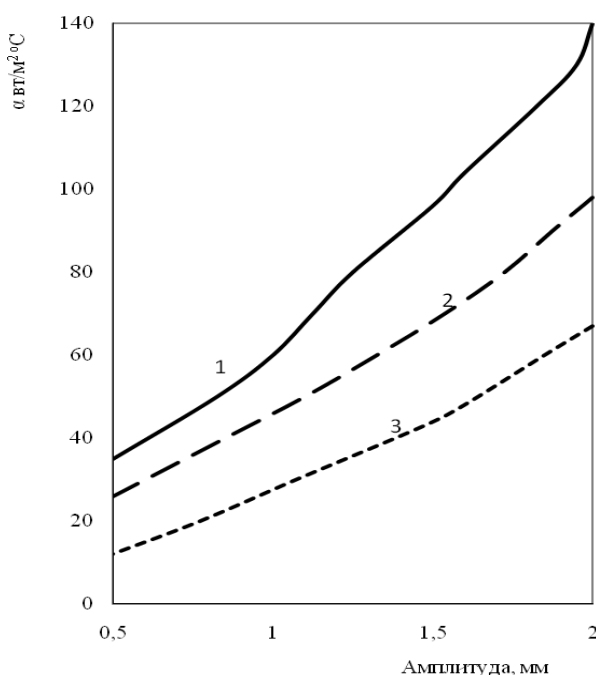


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи в пульсирующем потоке от амплитуды вибрации витков для различных диаметров проволоки. 1 – диаметр проволоки 15 мм, 2 – диаметр проволоки 10 мм, 3 – диаметр проволоки 5 мм

При моделировании индукционного нагрева мотков проволоки и бунтов калиброванной стали для комплексного учета всех составляющих теплообмена необходимо в обобщенный коэффициент теплообмена внести составляющую, учитывающую теплообмен в пульсирующем потоке воздуха, образующегося при вибрации витков проволоки. С этой целью при расчете тепловых полей следует определять добавочный коэффициент, учитывающий теплообмен конвекцией:

$$\lambda_g = \alpha \delta / (G_r p_r)^{0,25}$$

В рассматриваемом нами случае за δ следует принять сумму воздушных прослоек в расчетном слое, являющуюся функцией плотности намотки.

Третья глава посвящена способам определения эффективного электрического сопротивления и эффективной теплопроводности мотков проволоки, рулонов стальной ленты. Рулоны стальной ленты и мотки проволоки имеют неоднородную структуру содержащую как ферромагнитные, так и воздушные участки, что значительно снижает эффективность нагрева. Использование уравнений электродинамики предполагает рассмотрение бунта проволоки как объекта нагрева в целом, обладающим неоднородными свойствами по объему.

Эффективное удельное электрическое сопротивление (по аналогии с общепринятым понятием «эффективная теплопроводность анизотропных тел») бунта проволоки ρ_b зависит не только от удельного электрического сопротивления металла ρ_{me} , температуры t , но и от переходного сопротивления контактов между витками в мотке, т.о. является функцией и плотности намотки η :

$$\rho = f(t, \eta, \rho_{me},)$$

Контактное сопротивление равно сумме переходного сопротивления и сопротивления контактирующих тел. Переходное сопротивление зависит от удельного сопротивления материала контакта, модуля упругости материала, усилия контактного нажатия и контактной твердости материала. Плотность намотки η прямо пропорциональна усилию натяжения при смотке и обратно пропорциональна диаметру проволоки и ее жесткости.

Для получения величины эффективного электрического сопротивления разработана имитационная модель, учитывающая геометрические характеристики бунта и плотность намотки. В качестве модели электрической цепи, отражающей внутреннюю структуру бунта использовался элементарный трехмерный куб, каждое из ребер которого может являться сопротивлением либо участка проволоки, либо контактным сопротивлением. Количество элементарных кубов определяется габаритными размерами мотка. Величина сопротивлений в элементарном кубе генерируется по методу Монте-Карло с помощью датчиков случайных чисел с учетом интегральной функции распределения длины участков проволоки и функции плотности вероятности распределения переходного сопротивления.

На рисунке 3 приведен график функции плотности вероятности распределения переходного сопротивления $f_1(R_{пер})$. Для мотка проволоки диаметром 2мм, из стали 08 КП получаем контактную твердость $T=634,6$ Н/мм². Величина контактного нажатия составляет 2,49 Н.

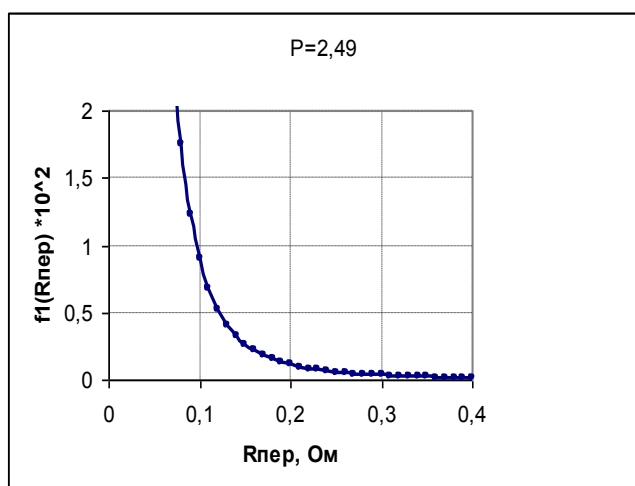


Рис. 3. Функция плотности вероятности распределения переходного сопротивления

Расчеты функции плотности вероятности распределения переходного сопротивления $f_1(R_{пер})$, проведенные для мотков проволоки показали, что вид функции плотности вероятности переходного сопротивления не зависит от величины контактного нажатия и его можно считать экспоненциальным с доверительной вероятностью 0,95

Коэффициент эффективной теплопроводности бунтов проволоки определялся на основании экспериментальных данных при решении обратной задачи теплопроводности.

Обратная задача теплопроводности состоит в нахождении коэффициента температуропроводности $a(t)$ по результатам измерения температуры $u(x_0, t)$ на расстоянии $x_0 > 0$ от границы и $u(0, t) = v(t)$ на границе. Эта задача сводится к решению интегрального уравнения Вольтерры 1 рода

$$\int_0^t \frac{x_0 \cdot v(\tau)}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot a^2(t - \tau)^3}} \exp\left[-\frac{x_0}{4 \cdot \pi^2(t - \tau)}\right] d\tau = u_0(x_0, t)$$

относительно a .

Вопрос устойчивости решения был исследован применительно к одному из наиболее употребляемых и эффективных методов – методов квадратур. Прежде чем осуществлять дискретизацию уравнения первого рода с помощью квадратурных формул необходимо произвести его регуляризацию. Метод квадратур можно трактовать как регуляризирующий алгоритм, в котором роль параметра регуляризации играет шаг квадратурной формулы. Для обеспечения устойчивости к нему был применен алгоритм h -регуляризации Апарцина – Бакушинского. При решении задачи использовались значения функций $u(x_0, t)$ и $v(t)$, полученные экспериментальным путем.

Для проверки правильности полученных результатов решалась прямая задача нахождения температурного поля при остывании бунтов проволоки с использованием полученных коэффициентов. Сравнение результатов расчета производилось с экспериментальными данными.

Четвертая глава посвящена комплексному экспериментальному исследованию преимуществ применения энергосберегающего способа индукционного нагрева для одной из основных продукции метизной отрасли. Исследование особенностей применения индукционных печей для термообработки бунтов проволоки проводилось в условиях Магнитогорского калибровочного завода и Московского завода «Серп и молот».

Цель экспериментального исследования – подтверждение основных теоретических положений. Этой целью определяются следующие основные задачи: подтверждение результатов теоретических исследований о влиянии плотности намотки бунта проволоки на скорости нагрева в индукционных нагревательных установках; определение зависимости скорости нагрева от плотности намотки; проверка влияния расположения бунта проволоки относительно других бунтов проволоки при укладке в стопы на скорость нагрева в индукционных нагревательных установках; определение влияния усадки стопы на соотношения высоты печи и стопы бунтов проволоки для обеспечения равномерности нагрева.

Исследование проводилось при нагреве бунтов с внешним диаметром 1,1 м и внутренним диаметром 0,7 м, диаметр проволоки 17,9 мм. В промышленных условиях бунты при термообработке складывают в виде стопы. Высота стопы 1,9 м; вес стопы 2,5 т. С повышением температуры снимается напряженное состояние металла, уменьшение высоты начинается

при достижении проволокой температуры 300°C и продолжается до 700°C в течение первых часов нагрева. Экспериментальные исследования показали, что уменьшение высоты составляет 15–20% от ее первоначальной высоты. Высота стопы после нагрева 1,5 м.

Исследования проводились в течение более 100 нагревов в промышленных условиях. Для определения влияния плотности намотки на скорость нагрева формировались стопы из бунтов одинаковых геометрических размеров, с одинаковым диаметром проволоки, одной марки стали. Стопы формировались из бунтов проволоки из стали марок 38ХГНМ, ШХ-15, А-75, 40Х. Анализ процесса нагрева бунтов проволоки из различных марок сталей показывает, градиент температуры по радиусу больше у бунтов с большей плотностью намотки.

При термообработке в индукционной печи скорость нагрева стопы бунтов составляла $200^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ – $250^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Применение скоростей нагрева больших, чем $250^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ приводит к высокой неравномерности распределения температуры по объему обрабатываемого металла, вследствие большого количества воздушных прослоек в бунте. В результате этого структурные превращения и рекристаллизационные процессы в объеме металла происходят неодновременно. Это будет являться причиной неравномерности механических свойств и неоднородности структуры отожженного металла. Применение скоростей меньших $200^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ увеличивает время нагрева, что приводит к увеличению обезуглероживания и уменьшения выхода годного.

Максимальный температурный перепад на внешней поверхности стопы между верхним и нижним бунтами в стопе в первой трети нагрева составляет не более 50°C , уменьшаясь к концу нагрева до 10°C . Для внутренней поверхности распределение температур несколько иное. Градиент температуры между верхним уровнем стопы бунтов и нижним различен для различных периодов нагрева. Так, через 0,5 часа от начала нагрева он составляет 40°C , через 2 часа градиент температуры максимальный и составляет 150°C .

На равномерность нагрева оказывает влияние место расположения бунта в стопе из-за различных условий теплообмена и условий для возникновения вынужденной конвекции вследствие вибрации витков проволоки в электромагнитном поле. Наименьшую равномерность имеют нижние бунты в стопе (при равномерном электромагнитном поле по высоте стопы).

Экспериментальные исследования показали, что учитывая особенности индукционного нагрева бунтов проволоки, уложенных в стопы, такие как уменьшение высоты стопы, нет необходимости в заглублении стопы внутри индуктора. Это повысит производительность печи и снизит расход электроэнергии. При расчетах конструктивных и электрических параметров индукционной установки необходимо учитывать увеличение плотности бунтов к низу стопы для обеспечения равномерного нагрева.

Пятая глава посвящена моделированию процессов, происходящих при индукционном нагреве стальной проволоки в бунтах, рулонов ленты - тел

обладающих физически неоднородной структурой с учетом их характерных особенностей.

Обобщенная модель индукционного нагрева рулонов ленты и бунтов калиброванной стали приведена на рисунке 4. Модели в каждом из приведенных блоков базируются на различных физических законах и требуют своих специализированных методов решения. Модель, представленная в первом блоке, рассчитывает характеристики исследуемых объектов. Для их определения требуется применение методов теории вероятностей и математической статистики. Имитационная модель, представленная в первом блоке, рассмотрена в третьей главе.

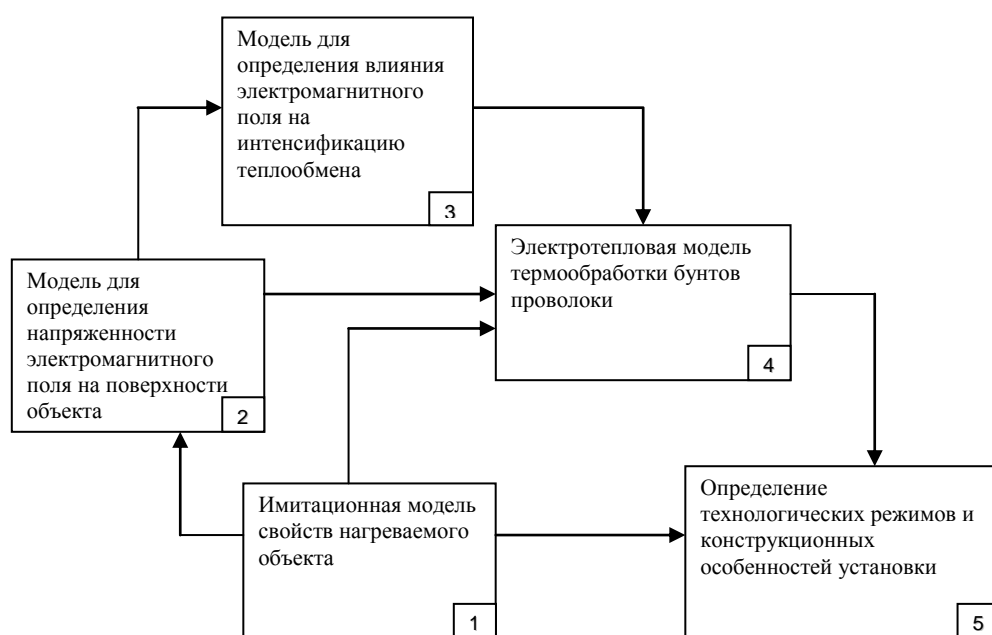


Рис. 4. Обобщенная модель индукционного нагрева рулонов ленты и бунтов калиброванной стали

Модель, представленная во втором блоке, описывает распространение электромагнитной энергии в системе и содержит уравнения электродинамики в интегральной форме. Реализация модели требует применения специальных методов решения интегральных уравнений. Модель, представленная в третьем блоке, описывает влияние электромагнитного поля системы на возникновение вибрации витков проволоки, вызывающей дополнительный перенос теплоты. Для ее реализации необходимо решение, полученное при реализации модели из блока два и применение методов теории гидродинамики. Модель, представленная в третьем блоке, рассмотрена во второй главе.

Модель, представленная в четвертом блоке, описывает распределение температурных полей в исследуемом объекте. Она базируется на решении уравнения теплопроводности Фурье с внутренними источниками теплоты с переменными коэффициентами, при решении которого может использоваться метод конечных разностей и метод конечных элементов.

Проведено численное моделирование процесса индукционного нагрева бунтов калиброванной стали с учетом специфических особенностей нагрева бунтов проволоки, таких как изменение высоты и плотности стопы бунтов проволоки, интенсификация теплообмена при вибрации витков проволоки.

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и температурного полей с соответствующими краевыми условиями.

Поле в любой точке определяется как сумма полей, создаваемых всеми источниками, первичными и вторичными. Потенциалы и напряженности поля связаны с источниками интегральными формулами

$$A = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J dV}{R},$$

$$u = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma dS}{R},$$

$$H = \frac{1}{4\pi} \int \frac{J \times R}{R^3} dV,$$

$$E = E^B + E^\Pi = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\partial J}{\partial t} \frac{dV}{R} + \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma R}{R^3} dS,$$

где H, B – векторы напряженности и индукции магнитного поля; J – вектор плотности тока; σ – плотность электрических зарядов; A – магнитный потенциал; R – модуль вектора, соединяющего точку наблюдения с точкой источника; E^B, E^Π – вихревая и потенциальная составляющие электрического поля; ϵ, μ – относительные электрическая и магнитная проницаемости; ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

Распределение внутренних источников теплоты, полученное при решении электромагнитной задачи используется при определении температурных полей в нагреваемом объекте. Распределение температурных полей в стопе по радиусу и высоте можно определить с помощью двумерного уравнения Фурье с внутренними источниками теплоты $W(z, R)$, с граничными условиями 3 рода:

$$c\rho'(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W(z, R)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r}(R_0, z, \tau) = -\alpha_1 [T(R_0, z, \tau) - T_{C1}(\tau)]$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r}(R_1, z, \tau) = \alpha [T(R_1, z, \tau) - T_C(\tau)]$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}(r, H, \tau) = \alpha_1 [T(r, H, \tau) - T_{C1}(\tau)]$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}(r, 0, \tau) = 0$$

$$T(r, z, 0) = T_H(r, z),$$

где c , λ , ρ -коэффициенты удельной теплоемкости, эффективной теплопроводности и плотность стопы бунтов; α , α_1 - коэффициенты теплоотдачи боковой и торцевой поверхностей стопы; T_C , T_{C1} - температуры воды, охлаждающей индуктор, и воздуха в печи; R_0 , R_1 , H –внутренний и внешний радиус бунта проволоки и высота стопы.

Решение реализовано путем замены области непрерывного изменения температуры сеткой, а также заменой дифференциальных уравнений теплопроводности их конечно-разностными аналогами, что позволило перейти к решению обыкновенных алгебраических уравнений на каждом элементарном шаге по времени. При решении системы уравнений использовались зависимости для определения эффективного удельного электрического сопротивления бунта проволоки.

В собранной стопе нижние бунты испытывают давление верхних бунтов, это увеличивает коэффициент заполнения бунта, уменьшает количество витков, совершающих колебания, что оказывает влияние на коэффициент эффективной теплопроводности бунта и на величину удельного электрического сопротивления. При нагреве от 300 °С до 700 °С в течение первых часов нагрева происходит уменьшение высоты стопы бунтов. Зависимость высоты стопы от температуры выражается линейным законом с эмпирическим коэффициентом.

Для подтверждения корректности разработанных моделей произведена идентификация математической модели по результатам промышленных экспериментов. На рисунке 5 приведены результаты расчета температурных полей по радиусу бунта, при которых учитывались отличия электрофизических и теплофизических свойств бунта проволоки и изменение высоты стопы бунтов, но не учитывалось влияние вибрации витков проволоки на интенсификацию теплообмена. Ошибка в расчетах составила для внешней поверхности бунта 15%, для внутренней поверхности ошибка в расчетах составила 30%.

На рисунке 6 приведены результаты расчета температурных полей по радиусу бунта, при которых учитывались отличия электрофизических и теплофизических свойств бунта проволоки, изменение высоты стопы бунтов и влияние вибрации витков проволоки на интенсификацию теплообмена. К окончанию нагрева для внешней и внутренней поверхностей расхождение составило 15–20°С, ошибка при расчетах составляет 3–4%.

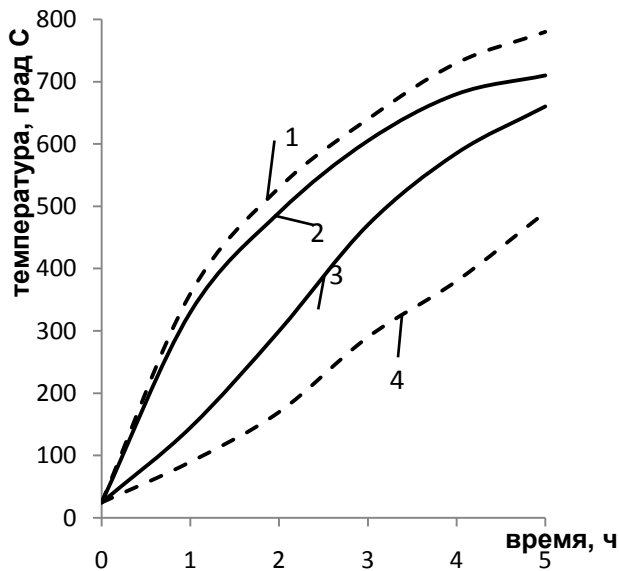


Рис. 5. Сравнение результатов расчета температурного поля бунта, находящегося в середине стопы без учета конвективного теплопереноса с экспериментальными данными; 1 – внешняя поверхность результаты расчета, 2 – внешняя поверхность экспериментальные данные, 3 – внутренняя поверхность результаты расчета, 4 – внутренняя поверхность экспериментальные данные

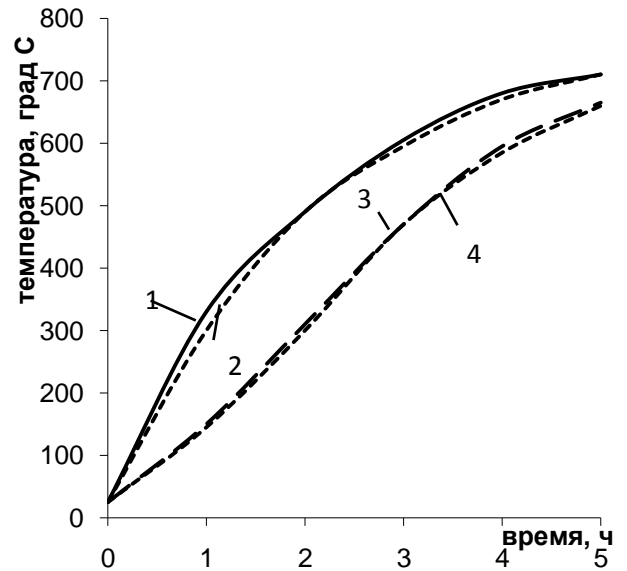


Рис.6. Сравнение результатов расчета температурного поля бунта, находящегося в середине стопы с учетом конвективного теплопереноса с экспериментальными данными; 1 – внешняя поверхность экспериментальные данные, 2 – внешняя поверхность результаты расчета, 3 – внутренняя поверхность экспериментальные данные, 4 – внутренняя поверхность результаты расчета

Температурные поля бунтов проволоки, расположенных на разных уровнях в индукционной печи периодического действия имеют некоторые различия. На рисунке 7 приведены результаты расчетов температурных полей по объему стопы через час от начала нагрева.

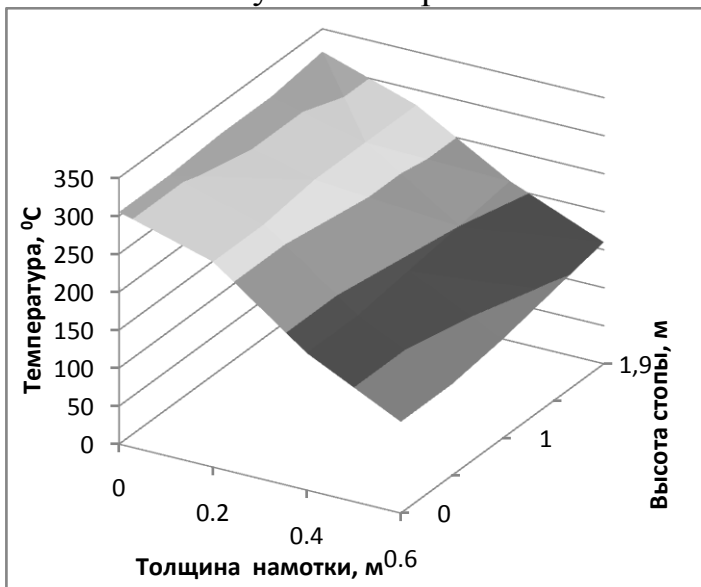


Рис.7. Температурное поле по объему стопы бунтов проволоки через час от начала нагрева

Наиболее холодной является точка на внутренней поверхности нижнего бунта. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что точность расчета составляет 3-5%. Внешняя и внутренняя поверхность стопы бунтов проволоки находятся в различных условиях охлаждения.

При моделировании температурного поля стопы бунтов проволоки во время технологических выдержек получено, что для стабилизации среднemasсовой температуры изменение температуры внешней поверхности должно составлять не менее 25 °С.

В шестой главе рассмотрены варианты конструктивного решения установки индукционного нагрева периодического действия для термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали, использование результатов исследования для разработки технологических режимов термообработки.

Индукционная печь шахтного типа приведена на рисунке 8. Она конструктивно состоит из нижнего фланца 1, футерованного огнеупорным кирпичом, и верхнего фланца 2 с вырезами для торцов продольных магнитопроводов 3, выполненных в виде пакетов из изолированных лаком листов электротехнической стали стянутых между уголками с помощью болтов через электроизолирующие втулки.

Концы магнитопроводов жестко скрепляются с обоими фланцами. Между ними располагается многосекционный индуктор 4, нижний виток которого опирается на диэлектрическое кольцо 5, а верхний через диэлектрические подкладки 6 прижимается болтами 7, установленными с внутренней стороны верхних концов продольных магнитопроводов. В нижнем фланце располагаются нижние радиальные магнитопроводы 8, прикрепленные к нижним торцам продольных магнитопроводов. Верхние радиальные магнитопроводы 9 устанавливаются внутри крышки 10 в радиальных окнах ее опорного кольца. Витки индуктора фиксируются в радиальном направлении деревянными брусками 11, поджимаемыми болтами через опорные металлические пластины. Внутри индуктора помещаются тепловой экран 12 из высокоглиноземистого войлока и направляющие 13 для центровки якоря 14 с садкой. Индукционный нагреватель имеет десять секций, состоящих из 8 витков каждая. Секции имеют три параллельные ветви, две из которых включают в себя по три последовательно включенных секции, а третья ветвь – четыре последовательно включенных секции. Конструктивное решение позволяет переключать секции между нагревами. При снятой крышке внутри печи устанавливают якорь с садкой, который при опускании в печь центрируется направляющими, что защищает от повреждений тепловую изоляцию. Затем на верхний фланец опускают крышку и подключают печь к электросети. Печь мощностью до 270 кВт, потребляющую 1440 МДж/т электроэнергии установлена на одном из калибровочных заводов. Печь имеет диаметр 1,8 м и высоту 2,5 м.

Промышленной эксплуатацией индукционной нагревательной печи подтверждено, что применение энергосберегающей технологии индукционного нагрева для термообработки проволоки в бунтах позволяет снижать удельный расход электроэнергии на обработку до 50 % по сравнению с расходом электроэнергии при термообработке в колпаковых электропечах СКБ-6001.

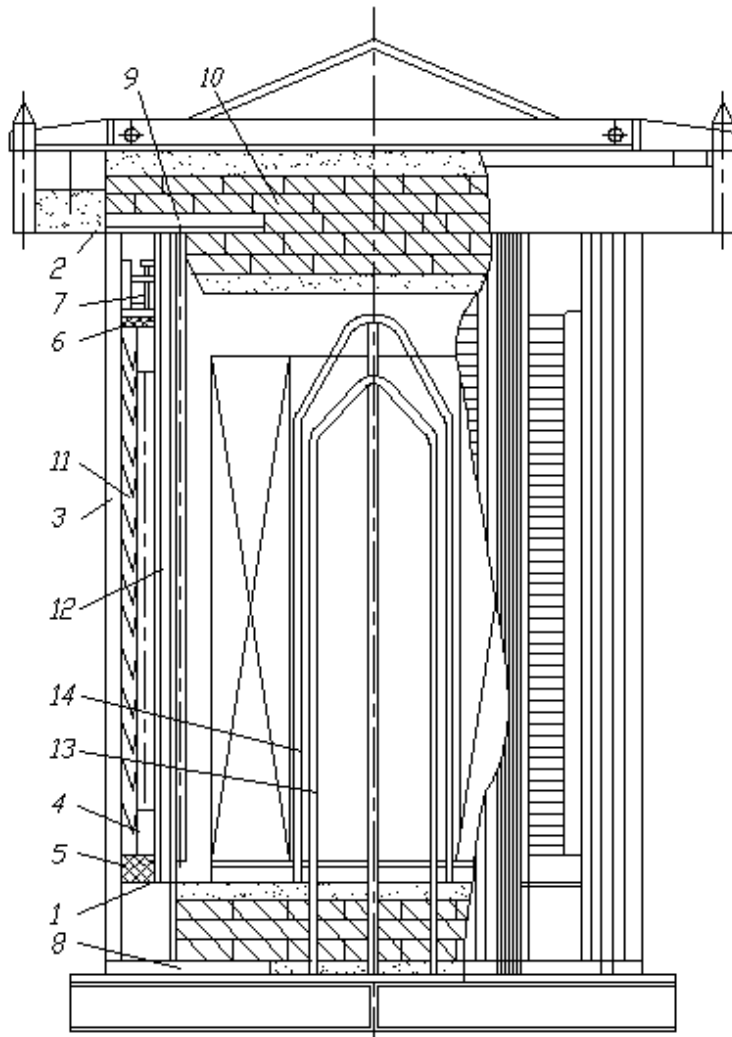


Рис. 8. Конструкция индукционной печи

Анализ приведенных экспериментальных данных подтверждает, что при нагреве стопы бунтов проволоки необходимо учитывать специфику свойств объекта нагрева.

В этом случае нет необходимости в усилении электромагнитного поля по краям стопы бунтов и увеличения высоты индукционного нагревателя по сравнению с высотой стопы. Принимая во внимание указанные выше особенности нагрева стопы бунтов проволоки как ее уменьшение в течение нагрева можно предположить, что высота индукционного нагревателя может быть меньше, чем высота стопы бунтов проволоки до начала нагрева. Уменьшение количества индукционных нагревателей

обеспечит снижение расхода электроэнергии на нагрев.

Экспериментально подтвержден теоретический вывод о том, что с целью рационального использования мощности индукционного нагревателя в течение всего нагрева и повышения производительности верхний край стопы может выступать на 5-10 % от высоты индуктора над его верхним краем. При оседании стопы в первый период нагрева она займет нужное положение, обеспечивающее равномерный нагрев по высоте. Увеличение производительности печи составит при этом 20 %. Рассмотрены вопросы реализации закона управления индукционным нагревателем, обеспечивающего минимальный расход электроэнергии.

В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований разработан и проверен в промышленных условиях энергоэффективный режим термообработки проволоки в бунтах в индукционных установках периодического действия. Повышение скорости нагрева калиброванного металла в бунтах легированных марок сталей до 200-250 $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ в сочетании с изотермическими выдержками при температурах выше и ниже A_{C1} улучшает качество термической обработки на зернистый

перлит. Выход годного составляет 100 %. Варианты технологических режимов, защищены авторским свидетельством.

Для оценки влияния способа и скорости нагрева на качество получаемого металла проводилось исследование не только полученных механических свойств металла, но и его исходных свойств. Исследование качества проводилось по следующим показателям: механические свойства (величина временного сопротивления разрыву, относительное удлинение, относительное сужение, твердость), структура металла, глубина обезуглероженного слоя. Металл, поступающий на термообработку, имел нестабильные свойства по всем трем показателям.

В промышленных условиях в индукционной печи было проведено более чем 100 отжигов бунтов калиброванной стали, преимущественно легированной, общей массой до 350 тонн. Отбор образцов производился от каждого бунта в количестве определенном ГОСТом. Всего было исследовано более 1000 образцов из стали марки 38ХГНМ. Результаты статистической обработки показателей временного сопротивления разрыву металла после термообработки в индукционной печи и печи электросопротивления приведены на рисунке 9. Величина временного сопротивления разрыву исходного металла изменяется в широком диапазоне от 570 МПа до 750 МПа. Показатель временного сопротивления разрыву после отжига не должен превышать величину 549 МПа.

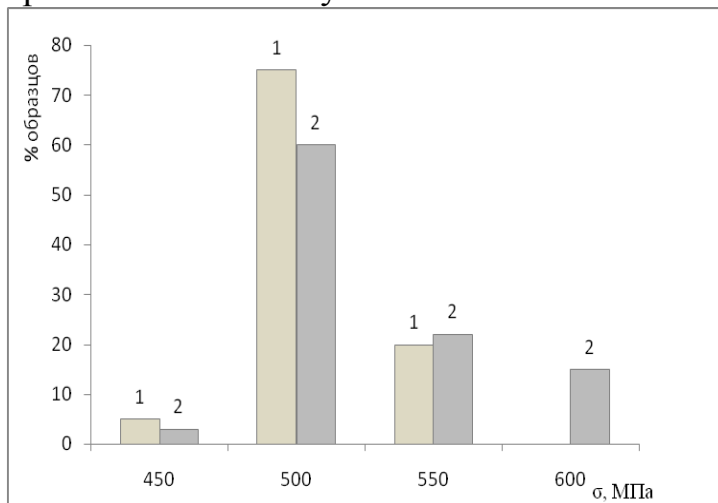


Рис.9. Сравнение величин временного сопротивления разрыву образцов обработанных в индукционной печи и электропечи сопротивления, 1 – индукционная печь, 2 – электропечь сопротивления.

После калибровки на готовый размер отклонение от предельно допустимых значений по величине временного сопротивления разрыву составляет для индукционной печи 3%, для электропечи сопротивления 11%. По параметрам относительное удлинение, относительное сужение, твердость отклонений не было.

Вторым показателем, по которому оценивается качество отожженного

металл, является структура металла. Исходный металл имеет структуру, содержащую от 10% до 80% зернистого перлита. Отклонения по структуре металла, отожженного в индукционной печи, составляет 4%, для электропечи сопротивления 8%.

Третьим показателем качества отожженного металла является глубина обезуглероженного слоя. В индукционной печи при отжиге любого исходного металла (вплоть до глубины обезуглероживания 0,4 мм на одну

сторону – предельный показатель для отожженного металла) не происходит увеличение обезуглероженного слоя, отклонений по глубине обезуглероженного слоя нет. Для электропечи сопротивления отклонение составляет до 8%. Проведенные исследования показали, что индукционный нагрев позволяет влиять на конечную структуру и свойства сталей в результате их термической обработки.

После каждого нагрева производилась оценка энергетических показателей нагрева. Расход электроэнергии в индукционной печи при термообработке калиброванного металла в бунтах составляет 350 кВтч/т, что более, чем в два раза меньше, чем в электропечах сопротивления.

В седьмой главе проведена оценка эффективности применения технологии индукционного нагрева при непрерывном процессе производства проволоки. Проведено моделирование электромагнитных процессов в непрерывной системе индуктор – пучок проволоки с целью определения энергетических показателей индукционных установок для термообработки проволоки. Моделирование электромагнитных процессов проводилось с помощью пакета программ Universal 2D. Используемая модель основана на комбинации численных методов, таких как метод конечных разностей (МКР) и метод интегральных уравнений (МИУ). Как результат комбинированного принципа построения модели, задача разбивается на внешнюю, решаемую методом МИУ, и внутреннюю (область загрузки), решаемую МКР. Сшивание задач происходит с помощью импедансных граничных условий.

Импедансные граничные условия позволяют не рассматривать поле внутри тела. В то же время адекватно учитывается реакция токов загрузки на внешнюю задачу. Сохраняется и распределение мощности по поверхности нагреваемого тела, определяемое вектором Пойтинга. Решение внутренней электротепловой задачи дает количественную картину распределения электромагнитного и температурного полей внутри нагреваемой заготовки и позволяет рассчитать импедансные условия на поверхности тела, необходимые для решения внешней задачи.

Установлено, что нагрев одной нити тонкой стальной проволоки диаметром 1-3 мм при частоте тока до 100 кГц неэффективен. Эффективность индукционного нагрева проволоки повышается, начиная с толщины проволоки 4 мм и более. КПД индукционной установки составляет от 0,7 до 0,9.

Одним из возможных вариантов повышения эффективности индукционного нагрева тонкой проволоки является одновременный нагрев в индукторе нескольких нитей проволоки. На рисунке 10 приведена зависимость КПД индукционной установки при нагреве проволоки 1 мм, различное количество нити которой объединены в пучок.

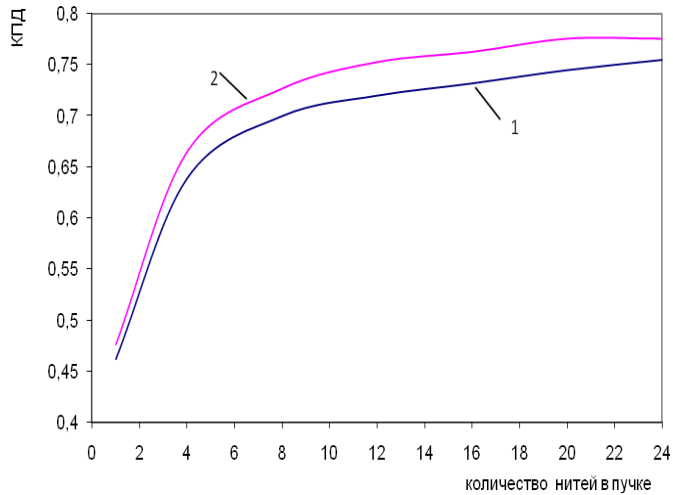


Рис. 10. КПД индукционной установки при нагреве проволоки диаметром 1мм до 700 °С. 1 – частота 66 кГц, 2 – частота 100 кГц

Объединение проволоки в пучок по несколько нитей позволяет повысить энергетические показатели индукционных установок. Количество проволок в пучке влияет на значение коэффициента полезного действия, особенно при изменении количества от 2 до 4-5 нитей проволоки. Дальнейшее увеличение количества нитей проволоки не приводит к значительному увеличению КПД.

Для каждого диаметра проволоки, нити которой объединены в пучке, определена минимальная частота, при которой нагрев становится эффективным, дальнейшее увеличение частоты не дает принципиальных приростов КПД.

Объединение проволок в пучок нитей проволоки диаметром 4 мм и более позволяет при том же КПД установки снизить частоту тока (рис. 11). При использовании одного индуктора для проволоки разной толщины при смене сортамента (например, изменении диаметра проволоки) будет изменяться КПД.

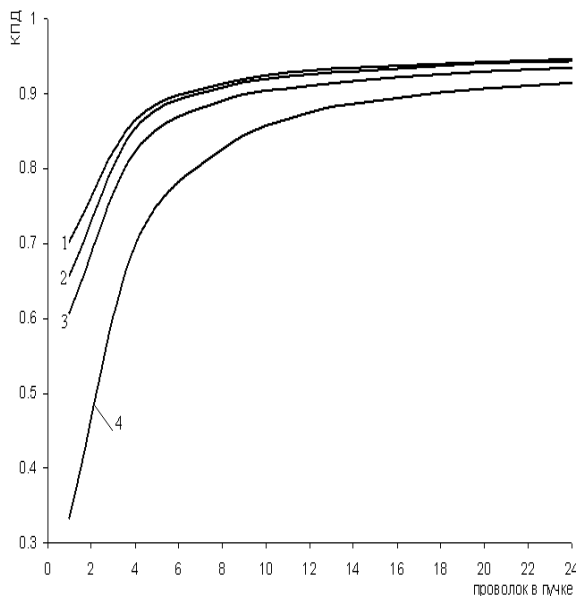


Рис. 11. КПД индукционной установки при нагреве проволоки диаметром 4мм до 700 °С на нескольких частотах: 1 – 100 кГц, 2 – 66 кГц, 3 – 30 кГц, 4 – 10 кГц.

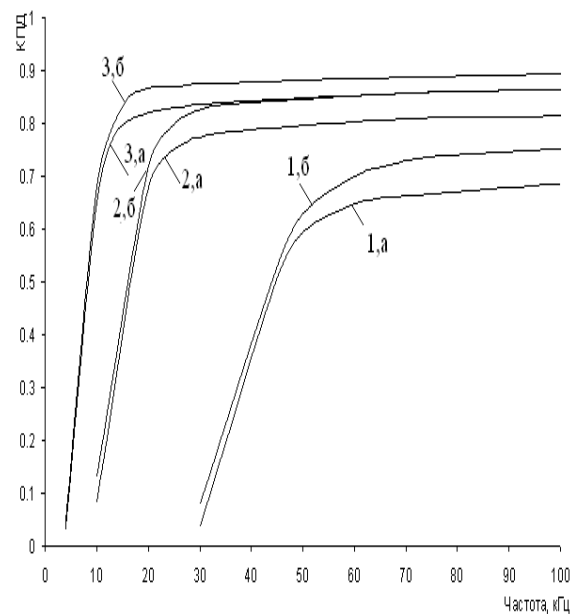


Рис.12. КПД индукционной установки при нагреве до 700 °С пучка из 12 нитей проволоки различного диаметра а– в универсальном индукторе для 12 нитей проволоки до 8мм , б – в индукторе для 12 нитей проволоки до 3 мм; 1 – 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – 3 мм

Результаты исследования возможности использования одного и того же индуктора для нагрева проволоки диаметром от 1 мм до 8 мм приведены на рисунке 12. Использование более узкого индуктора для сортамента тонкой проволоки дает выигрыш в КПД около 5%.

Заключение

В диссертации поставлена и решена актуальная научно-техническая проблема в области электротехнологии, имеющая важное народно-хозяйственное значение, заключающаяся в применении индукционного способа нагрева в метизной промышленности для ранее не используемого класса объектов.

Проведенные комплексные экспериментальные исследования подтверждают, что применение энергосберегающей технологии индукционного нагрева значительно увеличивает скорость нагрева при термообработке крупногабаритных бунтов проволоки, снижает расход электроэнергии, сокращает продолжительность термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали и повышает производительность работы термических отделений.

Основные итоги проведенного комплексного исследования эффективности применения энергосберегающих технологий индукционного нагрева заключаются в следующем.

1. Термическая обработка с применением индукционных нагревательных установок позволяет влиять на конечную структуру и свойства проволоки. На формирование структуры проволоки при термообработке оказывает влияние способ и скорость нагрева до температуры начала аустенитного превращения. Значительное сокращение продолжительности термообработки бунтов проволоки и рулонов металлической ленты возможно за счет увеличения скорости нагрева до температуры A_{c1} .
2. На основе теоретического и экспериментального исследования установлены факторы, влияющие на повышение эффективности применения индукционного способа нагрева для мотков проволоки и бунтов калиброванной стали. Этими факторами является появление колеблющихся потоков воздуха, возникновение вынужденной конвекции при вибрации витков проволоки в электромагнитном поле. Разработана методика расчета коэффициента теплоотдачи при вибрации витков проволоки при индукционном нагреве. Подтверждено, что перенос теплоты вглубь бунта происходит не только за счет нагрева внутренними источниками теплоты и эффективной теплопроводности бунта, но и за счет теплообмена в колеблющемся потоке воздуха.
3. Для комплексного анализа факторов эффективности применения энергосберегающей технологии индукционного нагрева для термообработки изделий метизной отрасли разработана обобщенная математическая модель индукционного нагрева тел, обладающих неравномерностью свойств по объему. Для этого в работе исследованы основные особенности и

сформулированы требования к набору моделей, описывающих процесс индукционной термической обработки рулонов металлической ленты и бунтов проволоки и калиброванной стали. К таким требованиям относятся необходимость учета эффектов, обусловленные структурой объектов, а именно снижение электрофизических и теплофизических свойств объектов нагрева; изменение геометрических размеров и плотности объектов нагрева. Также необходимо учитывать проявление дополнительных эффектов, возникающих вследствие сочетания эффектов присущих индукционному способу нагрева и характерных особенностей объекта. Дополнительным эффектом является вибрация витков проволоки в электромагнитном поле и, как следствие, появление вынужденной конвекции, возникающей при вибрации витков проволоки.

4. Дано теоретическое обоснование влияния размеров бунтов проволоки на методику аналитического расчета электромагнитных полей в системах индукционного нагрева, базирующегося на общих принципах расчета электромагнитных полей в устройствах индукционного нагрева.

5. Разработана имитационная модель для определения эффективного электрического сопротивления бунтов проволоки. В имитационной модели с помощью датчика псевдослучайных чисел, получают структуру бунта проволоки, имитирующую количество слоёв с последовательно соединёнными сопротивлениями в каждом слое, и число контактных сопротивлений между соседними слоями. Получены зависимости для определения величины контактного нажатия. Разработанная методика определения эффективного электрического сопротивления бунтов проволоки позволяет учитывать физические свойства металла, из которого изготовлена проволока, условия намотки бунтов, влияние контактов между витками. Проведено определение эффективных значений теплофизических характеристик на основе решения обратной задачи теплопроводности.

6. Проведено численное моделирование процесса индукционного нагрева бунтов калиброванной стали в установке периодического действия с учетом специфических особенностей нагрева бунтов проволоки, таких как изменение высоты и плотности стопы бунтов проволоки, интенсификация теплообмена при вибрации витков проволоки. Определены тепловые поля стопы бунтов проволоки при термообработке в индукционных установках периодического действия. Для подтверждения корректности разработанных моделей произведена идентификация математической модели по результатам промышленных экспериментов. Ошибка при определении температурных полей не превышает 5 %.

7. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при расчетах температурных полей стопы бунтов проволоки, при расчетах конструктивных и электрических параметров индукционной установки периодического действия необходимо учитывать плотность намотки, положение бунта в стопе, а также уменьшение высоты стопы и увеличение плотности бунтов проволоки в течение нагрева.

8. В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований разработан и проверен в промышленных условиях энергоэффективный режим термообработки проволоки в бунтах в индукционных установках периодического действия. Повышение скорости нагрева калиброванного металла в бунтах легированных марок сталей до 200-250 °С/ч в сочетании с изотермическими выдержками при температурах выше и ниже A_{C1} улучшает качество термической обработки на зернистый перлит. Выход годного составляет 100 %. Рассмотрены вопросы реализации закона управления индукционным нагревателем обеспечивающего минимальный расход электроэнергии.

9. Промышленной эксплуатацией индукционной нагревательной печи периодического действия подтверждено, что применение энергосберегающей технологии индукционного нагрева для термообработки проволоки в бунтах позволяет снижать удельный расход электроэнергии на обработку до 50 % по сравнению с термообработкой в колпаковых электропечах СКБ-6001.

10. При проектировании индукционных нагревательных установок периодического действия необходимо учитывать особенности нагрева стопы бунтов проволоки, такие как уменьшение высоты стопы в течение нагрева. Для увеличения производительности и снижения расхода электроэнергии верхний край стопы может выступать на 5-10% от высоты индуктора над его верхним краем. При оседании стопы в первый период нагрева она займет нужное положение, обеспечивающее равномерный нагрев по высоте. Увеличение производительности печи составит при этом 20 %.

11. Проведено исследование электромагнитных процессов в непрерывной системе индуктор – пучок проволоки с целью повышения энергетических показателей индукционных установок для термообработки проволоки. Установлено, что нагрев одной нити тонкой проволоки диаметром 1-3 мм при частоте тока до 100 кГц неэффективен. Эффективность индукционного нагрева проволоки повышается, начиная с толщины проволоки 4 мм и более даже одной нити проволоки. КПД индукционной установки составляет от 0,7 до 0,9.

12. Объединение проволоки в пучок по несколько нитей позволяет повысить энергетические показатели индукционных установок. Количество проволок в пучке влияет на значение коэффициента полезного действия, особенно при изменении количества от 2 до 4-5 нитей проволоки. Дальнейшее увеличение количества нитей проволоки не приводит к значительному увеличению КПД. Для каждого диаметра проволоки, нити которой объединены в пучке, определена минимальная частота, при которой нагрев становится эффективным, дальнейшее увеличение частоты не дает принципиальных приростов КПД. Допустимо размер индуктора выбирать не под конкретное количество проволок, а допускающее некоторое уменьшение, но не более, чем в два раза

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
Монография

Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И., Торчинский В.Е. Математическое моделирование индукционного нагрева тел неоднородной структуры.- Магнитогорск: МГТУ, 2003. 93 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Баранкова И.И. Интенсификация отжига бунтов калиброванной стали в индукционных шахтных печах. [Текст] / И.И. Баранкова, Е.А. Пудов, А.Н. Иванов, В.Е. Торчинский, В.В. Кривошапов //Сталь. -1989. №8. С.74-76.
2. Баранкова И.И. Исследование вибрации витков проволоки в электромагнитном поле и ее влияние на ускорение нагрева. [Текст] / Рябков В.М., Котельников С.Ф., Баранкова И.И. //Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1989. №10. С.104-108.
3. Баранкова И.И. Моделирование процесса термообработки бунтов проволоки и калиброванной стали в индукционных печах. [Текст] / Баранкова И.И. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 9. С.53-56.
4. Баранкова И.И. Создание высокоэффективных модулей для электротермической обработки изделий метизной отрасли. [Текст] / Баранкова И.И. // Производство проката. 2007. № 1. С. 25-28.
5. Баранкова И.И. Влияние индукционного способа нагрева на качество термообработки калиброванной стали в бунтах. [Текст] / Баранкова И.И. // Электрометаллургия. 2009. №3, С.26-40.
6. Баранкова И.И. Определение теплофизических параметров анизотропных тел на основе решения обратных задач. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2009. №3. С. 35-39.
7. Баранкова И.И. Определение эффективного электрического сопротивления бунтов проволоки. [Текст] / Баранкова И.И. //Электричество.2010. № 2. С. 79-84.

Авторское свидетельство СССР

8. А.С. №1344795 (СССР) Способ отжига на зернистый перлит/ С.Ф. Котельников, И.И. Баранкова, Ю.И Тартаковский и др.// Б.И., 1987. №38. 3 с.

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

9. Баранкова И.И., Коринченко Г.М., Воронина О.Б., Сосед Т.Ю. Программа для решения краевых задач в интегральной форме Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7313. – М.: ВНИЦ, 2006. №50200602100.

Другие статьи и материалы конференций

10. Баранкова И.И. Индукционный нагрев тел с переменной плотностью. [Текст] / Котельников С.Ф., Баранкова И.И. //Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов: межвуз. сб. науч. трудов. Вып.9. Свердловск, 1986. С.11-15.
11. Баранкова И.И. Энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии [Текст] / В.Б. Демидович, Б.М. Никитин, В.Н. Иванов, В.И. Червинский, И.И. Баранкова // Техномир. 2008. №3. С.44-49.
12. Баранкова И.И. Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева [Текст] / В.Б. Демидович, Б.М. Никитин, В.Н. Иванов, В.И. Червинский, И.И. Баранкова // Индукционный нагрев. 2008. №4. С.24-30.
13. Баранкова И.И. Применение индукционного нагрева для электротермической обработки изделий метизной отрасли [Текст] / Баранкова И.И. // Индукционный нагрев. 2008. №4. С.30-32.
14. Баранкова И.И. Исследование влияния индукционного способа нагрева на качество термообработки калиброванной стали в бунтах [Текст]/ Баранкова И.И. // Индукционный нагрев. 2008. №5. С.37-40.
15. Баранкова И.И. Моделирование тепловых переходных режимов в индукционных нагревателях прутков [Текст] / В.Б. Демидович, П.А.Масликов, П.А. Ситько, И.И. Баранкова // Индукционный нагрев. 2009. №9. С. 11-16.
16. Баранкова И.И. Энергосберегающие технологии индукционного нагрева для метизной промышленности [Текст] / Баранкова И.И. // Индукционный нагрев. 2009. №10. С. 13-16.

17. Баранкова И.И. Математическое моделирование индукционного нагрева бунтов проволоки. [Текст] / Рябков В.М., Котельников С.Ф., Баранкова И.И. -М.- 7 с. Деп. в ЦНТБ ЧМ1986, №3142-86.
18. Баранкова И.И. Применение индукционного нагрева для термообработки калиброванной стали в бунтах марки ШХ-15. [Текст] / С.Ф. Котельников, И.И. Баранкова, Ю.И. Тартаковский, С.Б. Пушкин -М.- 6 с. Деп. в ЦНТБ ЧМ1986, №3119-86.
19. Баранкова И.И. Исследование рациональных конструкций индукционных печей для термообработки проволоки. [Текст] / Котельников С.Ф., Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И. // Энергосберегающие технологии и теплоэнергетические проблемы оптимизации печного хозяйства металлургических предприятий: докл. всесоюзной науч.-технич. конф. Миасс, 1987.-С.37.
20. Баранкова И.И. Влияние вибрации витков на индукционный нагрев калиброванной стали в бунтах. [Текст] / Котельников С.Ф., Баранкова И.И. //Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов: межвуз. сб. науч. трудов. Вып.10.-Свердловск,1987.-С.22-26.
21. Баранкова И.И. Расчет конструктивных и электрических параметров индукционного нагревателя для термообработки бунтов калиброванной стали. [Текст] / Котельников С.Ф., Баранкова И.И. -М.- 5 с. Деп. в ЦНТБ ЧМ1987, №4219-87.
22. Баранкова И.И. Повышение качества отжига крупногабаритных бунтов калиброванной стали в индукционных шахтных печах. [Текст] / Баранкова И.И., Иванов А.Н., Торчинский В.Е. //Проблемы теплотехники металлургических процессов и агрегатов: докл. 11 Всесоюзной науч.-технич. конф. молодых ученых – Свердловск, 1988. С.26.
23. Баранкова И.И. Разработка тепловых режимов индукционного нагрева нетрадиционных объектов. [Текст] / Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И., Торчинский В.Е.//Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: докл. всероссийской науч.-техн. конф.- Магнитогорск: МГТУ, 1998. С.55.
24. Баранкова И.И. Энерго- и ресурсосбережение при термообработке металла в индукционной печи. [Текст] / Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И., Торчинский В.Е. // Экологические проблемы промышленных зон Урала: сб. науч. тр. международ. науч.-техн. конф. Т.2- Магнитогорск: МГТУ, 1998. С.38-40.
25. Баранкова И.И. Математическое моделирование индукционного нагрева полых цилиндрических тел с внутренним магнитопроводом. [Текст] / Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И., Торчинский В.Е.// Теплотехника и теплоэнергетика в металлургии: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 1999. С.73-77.
26. Баранкова И.И. Математическое моделирование электромагнитных полей при индукционном нагреве заготовок большого размера. [Текст] / Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И., Серебренникова И.Г. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С.82-84.
27. Баранкова И.И. Применение метода интегральных уравнений для моделирования электромагнитных процессов в установках индукционного нагрева. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М. // Новые программные средства для предприятий Урала: сб. тр. региональной науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2003, Вып.2. С.178-181.
28. Баранкова И.И. Расчет устройств индукционного нагрева тел неоднородной структуры. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2004. С. 182-183.
29. Баранкова И.И. Плотность распределения коэффициента теплопроводности пористых тел типа бунтов проволоки при известных параметрах нормального распределения коэффициентов теплопроводности компонентов и степени наполнения. [Текст] / Баранкова И.И., Воронина О.Б. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2004. С. 96-100.

30. Баранкова И.И. Исследование эффективной электрической проводимости порозных тел. [Текст] / Баранкова И.И., Воронина О.Б. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2005. С.83-86.
31. Баранкова И.И. Использование регуляризованных решений обратной задачи теплопроводности для определения интегральных теплофизических свойств бунтов калиброванной стали. [Текст] / Баранкова И.И. // Новые программные средства для предприятий Урала: сб. тр. региональной науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2004. Вып.3. С.157-161.
32. Баранкова И.И. Расчет устройств индукционного нагрева тел неоднородной структуры методом Монте-Карло. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2005. С.261-264.
33. Баранкова И.И. Разработка программного обеспечения для моделирования процессов термообработки. [Текст] / Баранкова И.И., Воронина О.Б. // Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследованиях: труды III межвуз. конф. по науч. программному обеспечению. Спб.: «Нестор», 2005. С.74-76.
34. Баранкова И.И. Разработка программного обеспечения для моделирования электромагнитных полей. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М. // Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследованиях: труды III межвуз. конф. по науч. программному обеспечению. Спб.: «Нестор», 2005. С.72-74.
35. Баранкова И.И. Использование метода регуляризации Тихонова для решения дифференциальных уравнений в приложении к инженерным задачам. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М., Сосед Т.Ю. // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2005. С.7-10.
36. Баранкова И.И. Разработка обобщенных алгоритмов для решения интегральных уравнений. [Текст] / И.И. Баранкова, О.Б. Воронина, Г.М. Коринченко, С.А. Вайс // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2005. С.10-14.
37. Баранкова И.И. Программное обеспечение процесса электротермической обработки изделий метизной отрасли. [Текст] / И.И. Баранкова, О.Б. Воронина, Г.М. Коринченко, У.В. Михайлова // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: сб. тр. всероссийской науч.-техн. конф. Вып.1. Магнитогорск, 2005. С.134-135.
38. Баранкова И.И. Расчет взаимной индуктивности цилиндрических контуров с помощью эллиптических интегралов. [Текст] / Баранкова И.И., Коринченко Г.М. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2006. С.245-247.
39. Баранкова И.И. К вопросу об эффективной электрической проводимости порозных тел. [Текст] / Баранкова И.И., Воронин Б.И., Калугина О.Б. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2006. С.259-262.
40. Баранкова И.И. Компьютерное моделирование процессов электротермической обработки изделий метизной отрасли и его особенности. [Текст] / Баранкова И.И. // Компьютерное моделирование: труды 6 междунар. науч.-техн. конф. 28 июня-2 июля 2005 г. Санкт-Петербург. – Спб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. С. 238-239.
41. Баранкова И.И. Способ интенсификации термообработки калиброванной и холоднокатаной листовой стали [Текст] / Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: сб. тр. 7-ой междунар. науч.-техн. конф. 24-28.04.2006, Харьков, Украина: ХФТУ. 2006. С. 387-389.

42. Баранкова И.И. Использование индукционного нагрева для интенсификации термообработки бунтов калиброванной стали. [Текст] / Баранкова И.И., Воронина О.Б. //Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.4. Сб. тр. второй межд. науч.-практич. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 07-09.01.2006, Санкт-Петербург, Россия - СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. С.289-291.
43. Баранкова И.И. Обобщенная модель нагрева бунтов проволоки и рулонов ленты в индукционных установках [Текст] / Баранкова И.И. // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С.72-73.
44. Баранкова И.И. Имитационное моделирование электрофизических свойств тел с неоднородными свойствами. [Текст] / Баранкова И.И. // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С.73-76.
45. Баранкова И.И. Определение эффективной электрической проводимости порозных тел вероятностными методами [Текст] / Баранкова И.И., Воронин Б.И., Калугина О.Б. // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях: межвуз.сб. науч. тр. Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С.76-80.
46. Баранкова И.И. Использование индукционных печей для электротермической обработки изделий метизной отрасли [Текст] / Баранкова И.И. // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Череповец, 24-25 окт. 2005 г., посв. 50-летию ОАО «Северсталь». Вып. 2. ч. 1. Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2006. С.171-173.
47. Баранкова И.И. Индукционный модуль для термообработки калиброванной стали в мотках массой до трех тонн с использованием термоциклирования [Текст] / Баранкова И.И., Тартаковский Ю.И. // Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении: сб. докл. междунар. промышл. форума, г. Челябинск, 2007. С.137-138.
48. Баранкова И.И. Экологически чистые технологии для металлургической промышленности [Текст] / Баранкова И.И., Сотников Г.В. // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: сб. тр. пятой междунар. науч. – практ. конф., 28-30 апреля 2008 г. Санкт–Петербург, 2008. Т. 12. С. 479 – 482.
49. Баранкова И.И. Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии [Текст] / Демидович В.Б., Никитин Б.М., Баранкова И.И. // Труды IV междунар. науч.-практ. конф. М.:ФГОУ ВПО МИСИС, 2008 г.-С.234-241.
50. Баранкова И.И. Перспективы использования технологии индукционного нагрева в метизной отрасли [Текст] / Баранкова И.И. // Труды 2-ой Международ. науч.-технич. конф. «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» С-Петербург, 20-22 мая 2009 г.Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. С. 238-243.
51. Баранкова И.И. Моделирование тепловых переходных процессов в индукционных установках нагрева прутков [Текст] /И.И. Баранкова, Е.А. Григорьев, П.А. Масликов, Г.В. Петров // Труды 2-ой Международ. науч.-технич. конф. «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» С-Петербург, 20-22 мая 2009 г.Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. С.255-260.
- Учебные пособия**
52. Баранкова И.И. Энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлообрабатывающей промышленности [Текст] / В.Б. Демидович [и др.]; под ред. В.Б. Демидовича. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 323 с.
53. Баранкова И.И. Высокоэнергетические методы обработки материалов [Текст] / В.Б. Демидович, В.Ф. Чмиленко, И.И. Баранкова [и др.]; под ред. В.Б. Демидовича. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 368 с.