

На правах рукописи

Григорьев Евгений Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ
ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО НАГРЕВА
ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Специальность: 05.09.10– Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в межотраслевой лаборатории «Современные Электротехнологии» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Демидович Виктор Болеславович

Официальные оппоненты –

доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретических основ электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И. Ульянова (Ленина)
Гончаров Вадим Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехники и электротехнологии» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Иванов Дмитрий Владимирович

Ведущая организация –
Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Всероссийский Научно - Исследовательский Институт Токов Высокой Частоты ВНИИТВЧ (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится "___" _____ 2011 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 "___" _____ 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций

к.т.н, доцент

М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время благодаря комплексу уникальных физико-механических, а также химических свойств титановые сплавы находят все более широкое распространение в современной технике. Для обеспечения требуемых физико-механических свойств материалов из титановых сплавов предъявляются определенные требования к обработке таких изделий, в том числе и к термообработке. Перед пластической обработкой титановая заготовка должна обладать строго определенной температурой с высокой равномерностью по всему объему. Температура слитка не должна выходить за определенные пределы в течение всего процесса нагрева, при этом обязательным условием является неперевышение максимально допустимой температуры нагрева. Основной задачей, стоящей перед разработчиками оборудования для нагрева титановых сплавов, является определение возможности достижения максимально точного температурного режима заготовки и обеспечение предельно допустимой неравномерности нагрева.

Кроме того, в промышленных условиях часто приходится подвергать пластической обработке заготовки различной длины и диаметра, что вызывает определенные трудности при проектировании установок для термообработки таких изделий. Особенно это касается немагнитных легких сплавов, к которым относятся сплавы титана. Повышенные требования, предъявляемые при этом к качеству нагрева всех заготовок вне зависимости от их геометрических размеров, обуславливает задачу построения таких систем.

При этом немаловажным в тенденции энергосбережения в мировой энергетике является обеспечение максимальной энергоэффективности работы таких устройств. Кроме того, при нынешнем уровне и темпах развития мировой экономики наряду с высокими требованиями по качеству изделий, возникает задача увеличения производительности работы производств, в которых используется термообработка изделий из титановых сплавов. В данной ситуации применение традиционных способов термообработки часто бывает неприемлемым, и требуется разработка новых технологий и оборудования для обеспечения прецизионного нагрева титановых изделий.

Новые решения в области индукционного нагрева титановых изделий позволяют существенно повысить производительность предприятия, минимизировать энергетические затраты, но требует детального исследования для обеспечения необходимых температурных полей по длине и сечению нагреваемых заготовок.

Целью работы является исследование, разработка и внедрение энергосберегающих систем прецизионного нагрева заготовок из титановых сплавов индукционным способом.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) Анализ и классификация существующих способов и типов устройств индукционного нагрева (УИН) цилиндрических заготовок с возможностью организации прецизионного нагрева;
- 2) Разработка в среде UNIVERSAL 2D численной модели комплекса комбинированного нагрева, включающего в себя индукционный нагреватель цилиндрических заготовок и печь сопротивления, который позволяет обеспечивать прецизионный нагрев титановых заготовок с максимальной производительностью;
- 3) Исследование влияния различных средств пространственного управления на распределение температурного поля по объему заготовки;
- 4) Исследование возможности обеспечения качества нагрева цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра в одном индукционном нагревателе;
- 5) Разработка модели индукционного нагревателя цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра с учетом характеристики

источника питания (ТПЧ) и учетом неравномерных электрических потерь по виткам однослойных и многослойных индукторов;

6) Разработка методики проверки индукционного нагревателя периодического действия на технологическую точность нагрева и экспериментальная верификация разработанных математических моделей;

7) Оптимизация конструкции индукционного нагревателя и режимов работы комплекса по критерию энергоэффективности;

8) Определение принципов организации автоматизированной работы комплекса комбинированного нагрева для обеспечения прецизионного нагрева заготовок из титановых сплавов с информационным сопровождением в течение всего цикла подготовки слитка к прессованию.

Методы исследования. Исследования электромагнитных, температурных полей и интегральных параметров индукционных систем проводились методами математической физики и вычислительной математики. Достоверность полученных результатов определялась сравнением расчетных результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна и значимость работы состоит в следующем:

1) Разработана в среде UNIVERSAL 2D численная модель комплекса комбинированного нагрева, включающего в себе индукционный нагреватель цилиндрических заготовок и печь сопротивления, который позволяет обеспечивать прецизионный нагрев титановых заготовок с максимальной производительностью;

2) Разработана конструкция универсального индукционного нагревателя цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра с гарантированным обеспечением отсутствия перегрева по объему заготовки при контроле температуры в одной точке по центру заготовки;

3) Разработана модель индукционного нагревателя цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра с учетом характеристики источника питания (ТПЧ) и учетом неравномерных электрических потерь по виткам однослойных и многослойных индукторов;

4) Разработана методика оптимизации конструкции индукционного нагревателя и режимов работы комплекса по критерию энергоэффективности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Численная модель комплекса комбинированного нагрева, включающего в себе индукционный нагреватель цилиндрических заготовок и печь сопротивления, который позволяет обеспечивать прецизионный нагрев титановых заготовок с максимальной производительностью

2) Модель индукционного нагревателя цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра с учетом характеристики источника питания (ТПЧ) и учетом неравномерных электрических потерь по виткам однослойных и многослойных индукторов;

3) Запатентованная конструкция универсального индукционного нагревателя цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра с гарантированным обеспечением отсутствия перегрева по объему заготовки при контроле температуры в одной точке по центру заготовки;

4) методика оптимизации конструкции индукционного нагревателя и режимов работы комплекса по критерию энергоэффективности;

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1) Применение индукционного способа нагрева цилиндрических заготовок из титановых сплавов с последующим термостатированием в печи сопротивления позволяет обеспечить прецизионный нагрев с требуемым распределением температурного поля по длине и сечению заготовки с максимальной производительностью;

2) Применение разработанного индукционного нагревателя цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра с управлением процессом нагрева по пирометру, расположенному в середине индукционного нагревателя, позволяет обеспечить отсутствие брака при нагреве;

3) Разработанная численная модель комплекса комбинированного нагрева позволяет выполнить расчет характеристик процесса нагрева цилиндрической заготовки в зависимости от ее длины и диаметра, а также расположения заготовки в индукторе;

4) Разработанный способ оптимизации конструкции индукционного нагревателя позволяет выбрать оптимальный режим нагрева заготовок в комплексе «индукционные нагреватели – печи сопротивления»;

5) Разработанная модель многослойного индукционного нагревателя периодического действия позволяет оценить влияние различных пространственных средств управления температурным полем заготовки;

6) Внедрение в процесс термообработки заготовок из титановых сплавов комплекса комбинированного нагрева позволяет повысить производительность нагрева, качество изделий из титановых сплавов и понизить потребление энергии на тонну нагреваемого металла по сравнению с аналогичным нагревом в имеющихся печах сопротивления.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы используются в процессе проектирования индукционного оборудования во ФГУП «ВНИИТВЧ» и ООО «РТИН». Установка для нагрева изделий из сплавов титана внедрена на ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (подтверждено актом внедрения).

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и конференциях кафедры ЭТПТ и МОЛ СЭТ СПбГЭТУ (2008 – 2011), на 2-ой международной конференции АРІН-09 «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» (СПбГЭТУ, Санкт-Петербург, 2009), на 6-ой международной конференции по электромагнитной обработке материалов ЕРМ-2009 (Дрезден, Германия, 2009), на международном симпозиуме «НЕС-10 International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources» (Падуа, Италия, 2010), на 13-й международной конференции по электромеханике, электротехнологиям, электрическим материалам и компонентам ICSEE-2010 (Алушта, Крым, Украина, 2010), на международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011» (Екатеринбург, 2011), на международном молодежном форуме «Энергоэффективные электротехнологии» (Санкт-Петербург, 2011).

Диссертационная работа написана в рамках выполнения:

АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», регистрационный № проекта «2.1.2/2869»,

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, госконтракты ГК 14.740.11.0951 и ГК 14.740.11.0824.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 13 работах, среди которых 3 работы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых в действующем перечне ВАК, 1 статья в специализированном журнале, 7 работ в материалах международных конференций. По результатам научных исследований получен патент РФ на полезную модель №106480 «Индуктор для нагрева мерных заготовок» и патент РФ на полезную модель №107439 «Индуктор для периодического нагрева цилиндрических титановых заготовок различной длины».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 93 наименований. Работа изложена на 164 листах машинописного текста и содержит 53 рисунка и 7 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 сформулированы основные требования, предъявляемые к процессу термообработки заготовок из титановых сплавов для получения роторного качества металла, и проведен анализ существующих способов индукционного нагрева титановых заготовок технологиях обработкой давлением.

Особенности нагрева титана и его сплавов связаны с полиморфизмом металла, его химической активностью в диапазоне высоких температур и особенными тепло- и электрофизическими свойствами.

Полиморфизм заключается в изменении структуры кристаллической решетки титана при определенной температуре, называемой температурой полиморфных превращений (ТПП). У титановых сплавов вместо четкой границы между однофазными областями существует двухфазная область, ширина которой зависит от концентрации легирующих элементов. Вследствие размытости границы раздела фаз у титановых сплавов выделяют интервал температуры полиморфных превращений, величина которого зависит от содержания легирующих элементов в сплаве (табл. 1).

Таблица 1.

Сплав	BT1-00	BT4	BT5	BT6	BT8, BT9	BT14	BT15	BT23
ТПП, °C	880-890	960-1000	980-1030	970-1010	980-1020	920-960	750-800	890-930

Для формирования изделия из титанового сплава роторного качества путем прессования в области высоких температур, необходимо, чтобы распределение температурного поля по объему заготовки находилось в пределах интервала температуры полиморфных превращений.

При нагреве полуфабрикатов из титановых сплавов выше верхней границы интервала ТПП заготовка полностью теряет свойства упругости и твердости и является браком. Нагрев ниже нижней границы интервала ТПП приводит к тому, что очень твердая фаза металла повышает нагрузку на деформирующее оборудование и велика вероятность поломки его узлов.

Кроме того, высокий уровень окалинообразования и тепловых потерь с поверхности заготовки вследствие высокой химической активности при высокой температуре требует уменьшить время нахождения металла при повышенной температуре.

Таким образом, непременным условием обеспечения роторного качества титановой продукции является высокая точность распределения температурного поля по объему заготовки, исключение перегрева металла и минимизация времени процесса нагрева.

Для выполнения предъявляемых к качеству нагрева титановых заготовок требований применяются различные методы, среди которых предпочтение отдается электротермическим методам. Нагрев титана в газовых, мазутных и т.п. печах нежелателен из-за опасности загрязнения металла водородом. Среди электротермических способов нагрева наиболее перспективным с точки зрения скорости нагрева, мобильности, автоматизации и управляемости процесса нагрева является индукционный нагрев.

Для термообработки изделий из титановых сплавов в настоящее время применяются различные типы индукционных нагревателей. По режиму работы они подразделяются на установки методического, дискретного, периодического и возвратно-поступательного действия.

Технология обработки заготовок давлением предусматривает отношение длины заготовки к ее диаметру в пределах $2 \div 3$. Наличие неустранимых перепадов температуры на стыках заготовок при использовании дискретных нагревателей, а также серьезные трудности при транспортировке коротких заготовок по роликам внутри индуктора в случае использования установок методического и возвратно-поступательно действия приводит к тому, что наиболее подходящим способом для нагрева заготовок из титановых сплавов перед обработкой давлением является нагрев в периодическом индукционном нагревателе. Кроме того, применение дополнительных зон термостатирования на выходе из основного индуктора для выравнивания температуры по длине заготовки значительно увеличивает габариты установки и усложняет процесс управления нагревом.

В индукционных нагревателях периодического действия равномерный нагрев по длине заготовок обеспечивается за счет создания однородного магнитного поля в индукторе. В торцевой зоне загрузки происходит искажение линий напряженностей электрического и магнитного полей из-за краевых эффектов загрузки и индуктора. К сожалению, в связи с неравномерностью распределения источников теплоты по длине и сечению заготовки при нагреве ее индукционным способом получить абсолютно равномерное распределение температурного поля по объему заготовки невозможно. Применение различных средств пространственного управления температурным полем заготовки, к которым относятся: величина заглубления заготовки в индуктор, выбор частоты питающего напряжения, различное включение схемы питания индуктора, размагничивающие катушки, концентраторы поля, водоохлаждаемые короткозамкнутые металлические кольца, короткозамкнутые одновитковые катушки и т.д., лишь позволяет обеспечить предельно достижимую неравномерность нагрева по объему заготовки. Кроме того, использование одного индуктора для нагрева заготовок различной длины и диаметра не позволяет обеспечить требуемую точность нагрева всех заготовок. Достижение прецизионного нагрева с целью получения роторного качества заготовок из титановых сплавов с высокой производительностью возможно при использовании комбинации индукционного способа нагрева и нагрева с помощью печей сопротивления. Предварительный скоростной нагрев осуществляется в индукторе, дальнейшая выдержка с целью получения необходимой точности производится в печи сопротивления.

Во второй главе рассмотрены принципы построения электротепловых моделей, которые учитывают взаимное влияние электромагнитных и температурных полей.

Расчет электромагнитной и тепловой задач при построении электротепловых моделей основаны на совместном решении уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности.

Совместное решение электромагнитной и тепловой задач, связь которых обусловлена зависимостью удельного сопротивления от температуры, позволяет обеспечить адекватность разрабатываемых моделей реальным процессам нагрева заготовок. Моделирование процессов индукционного нагрева основано на комбинации численных методов, таких как метод конечных разностей (МКР) и метод интегральных уравнений (МИУ). Модель индукционного нагревателя периодического действия включает в себя расчет нагрева заготовки от начальной температуры до требуемой конечной и расчет температурного поля в процессе транспортировки ее к последующему оборудованию.

Программа расчета нагревателя периодического действия содержит четыре основных блока. В блоке 1 производится первичная обработка исходных данных, в том числе формирование пространственной сетки тепловой задачи, аппроксимация таблично заданных тепло- и электрофизических свойств, зависящих от температуры, установление эквивалентных граничных условий для тепловой задачи, учитывающих наличие футеровки, разбиение загрузки на элементы для электрической задачи. В блоке

2 производится расчет электрических параметров системы и распределения источников теплоты. Формирование массива внутренних источников теплоты в узлах пространственной сетки загрузки осуществляется в блоке 3 исходя из информации, полученной после решения электрической задачи. Там же происходит задание соответствующих граничных условий для тепловой задачи, причем на торцах и поверхности заготовки условия теплообмена могут быть заданы разными. Плотность тока, найденная в элементах загрузки в результате решения электрической задачи, аппроксимируется по радиусу в сечениях загрузки, совпадающих с центрами элементов. Это используется при нахождении массива внутренних источников теплоты в узлах пространственной сетки загрузки. В блоке 4 производится расчет температурного поля в заготовке, как с внутренними источниками теплоты, так и без них в процессе транспортировки. Кроме того, в этом блоке определяется мощность тепловых потерь с различных поверхностей заготовки.

Для использования в качестве материала нагреваемых заготовок различные титановые сплавы, была создана база данных, которая включила в себя множество значений характеристик сплавов с учетом их зависимости от температуры.

В третьей главе производится экспериментальное исследование системы индукционного нагрева заготовок из титановых сплавов с целью проверки на технологическую точность и адекватность реальному процессу нагрева разработанной в работе электротепловой двухмерной модели. Также приведены результаты внедрения ряда однотипных индукционных нагревателей в технологическую линию производства изделий из титановых сплавов, рассмотрены различные режимы работы линии и выданы рекомендации для повышения производительности и энергоэффективности.

Для проверки на технологическую точность нагрева заготовок из титановых сплавов по результатам численного моделирования был спроектирован индукционный нагреватель, который позволил оценить степень соответствия данных, рассчитанных по модели и данных, полученных в результате проведения эксперимента.

В качестве испытуемого образца исследуется заготовка из титанового сплава ВТ6 длиной 1150 мм и диаметром 133 мм. Используется 48-витковый индукционный нагреватель периодического действия длиной 1380 мм и диаметром 206 мм. Внутри индуктора расположена жаропрочная футеровка, на которой располагается заготовка. Направляющая в индукторе отсутствует. Для оценки распределения температурного поля по объему в заготовку зачеканиваются 12 термопар. Термопары индуктора подключаются к самописцу, который регистрирует значения температур данных термопар на бумаге.

Заготовка располагается в индукторе симметрично, с заглублением 115 мм от торца индуктора. Кроме величины заглубления заготовки в индуктор и выбора частоты питающего напряжения в качестве пространственного средства управления используются тепловые торцевые заглушки, выполненные из жаропрочного асбеста.

В результате выполнения эксперимента снимаются температурные кривые термопар, по значениям которых можно оценить адекватность используемой численной модели индукционного нагревателя реальному эксперименту.

Анализируя результаты эксперимента и сравнивая полученные экспериментальным путем значения температур в определенных точках заготовки с соответствующими значениями теоретической кривой, можно сделать следующие выводы:

1. Характер изменения кривой экспериментальных данных во времени во всех измеряемых точках соответствует форме теоретической кривой температур;
2. Максимальное отличие расчетных значений температур и экспериментальных данных не превышает 10°C ;

3. Максимальный температурный перепад между измеряемыми точками при нагреве заготовки длиной 1150 мм и диаметром 133 мм в данном индукторе в случае поддержания напряжения на индукторе $U_{и} = 300\text{В}$ и частоты $f_N = 1000\text{Гц}$ составляет:

$\pm 23^\circ\text{C}$ – полученный в результате теоретического моделирования;

$\pm 17^\circ\text{C}$ – полученный в результате проведения эксперимента.

Полученные в процессе моделирования результаты использованы на заводе ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». В частности выработаны рекомендации для настройки оптимального режима работы индукторов для нагрева титановых заготовок под прошивку на стане ПВП 40-80.

В четвертой главе производится оптимизация конструкции индукционного нагревателя периодического действия для нагрева заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра.

При проектировании индукционного нагревателя периодического действия для нагрева заготовок различной длины и диаметра необходимо обеспечить предельно достижимую неравномерность распределения температурного поля по объему с учетом перегрева заготовки выше интервала ТПП в любой момент времени. Контроль температуры заготовки осуществляется пирометром, расположенным в середине нагревателя. Пирометр расположен в средней части индуктора и измеряет температуру на поверхности заготовки в ее центральном сечении при условии симметричного расположения ее в индукторе. В этом случае при оптимизации конструкции индукционного нагревателя периодического действия, при которой в данной точке будет обеспечиваться максимальная температура по всей длине, будет гарантировано отсутствие брака при нагреве заготовок различной длины и диаметра.

На основе разработанной 2D – модели исследовано влияние различных средств пространственного управления для получения требуемого распределения температурного поля заготовки, в том числе: выбор частоты питающего напряжения нагревательного контура, выбор величины заглубления заготовки в индуктор, использование тепловых торцевых заглушек для уменьшения величины тепловых потерь и изменение настила плотности тока. Правильный выбор частоты и заглубления заготовки в индуктор, а также использование тепловых торцевых заглушек позволяют обеспечить предельную достижимую неравномерность нагрева заготовки в индукционном нагревателе периодического действия. Изменение длины или диаметра заготовки приводит к увеличению предельной неравномерности температурного поля заготовки (см. рис. 1), причем изменение длины сказывается значительно существеннее, чем изменение диаметра. При нагреве заготовок различной длины и диаметра выполнение вышеперечисленных требований к нагреву заготовок из титановых сплавов осуществляется, в том числе, за счет изменения настила плотности тока вследствие применения разрывов в витках наружного слоя двухслойного индуктора (см. рис. 2). Благодаря перераспределению мощности по длине индуктора точка в середине заготовки на ее поверхности обладает максимальной температурой, контроль за которой позволяет не допустить перегрев заготовки выше ТПП вне зависимости от ее длины при условии ее симметричного расположения в индукторе.

Изменение геометрических размеров заготовки приводит к изменению общей индуктивности нагревательного контура, что влечет за собой проблемы согласования с источником питания, которым является тиристорный преобразователь частоты. При неизменной компенсирующей емкости контура меняется частота питающего напряжения, для сохранения номинальной частоты питания необходима подстройка контура за счет изменения величины компенсирующей емкости. Использование разработанной при выполнении работы модели «индукционный нагреватель - ТПЧ» позволяет исследовать влияние изменения частоты питающего напряжения при изменении геометрических размеров заготовки на энергетический аспект и аспект качества нагрева заготовок.

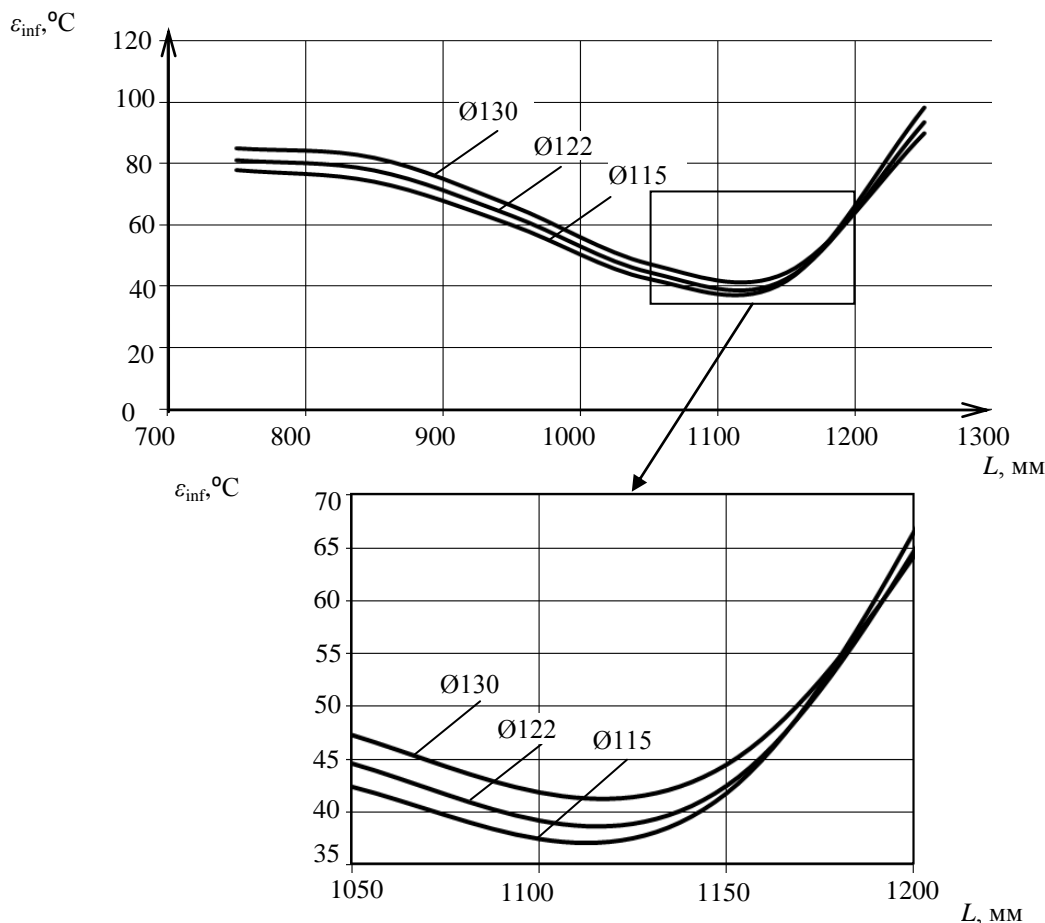


Рис. 1. Кривые зависимости перепада температуры заготовки по длине в зависимости от ее геометрических размеров при нагреве в индукторе диаметром $D_{II}=206$ мм и длиной $L_{II}=1380$ мм

Для исследования энергоэффективности разрабатываемой технологии нагрева заготовок из титановых сплавов создана модель электрических потерь в многослойном индукционном нагревателе периодического действия. Данная модель позволяет наглядно представить распределение витковых сопротивлений многослойного индуктора (рис. 3) и оценить влияние толщины стенки, количества слоев и взаимного расположения витков трубки индуктора, а также расположения и размеров загрузки на распределение сопротивлений по каждому витку индуктора. Благодаря использованию

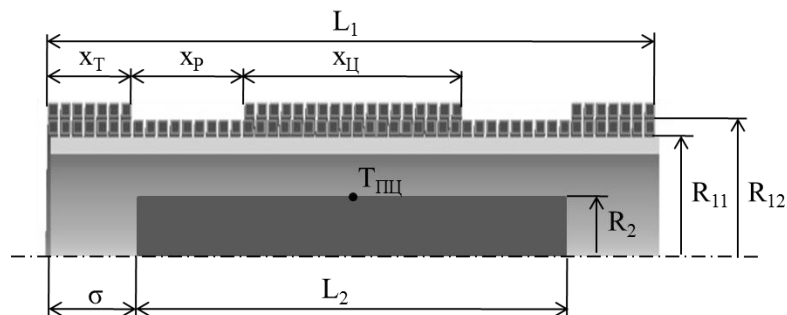


Рис. 2. Основные геометрические характеристики индуктора с разрывами L_I – длина индуктора; L_2 – длина заготовки; σ – заглубление заготовки в индуктор; x_T – длина торцевой зоны внешнего слоя индуктора; x_{II} – длина центральной зоны внешнего слоя индуктора; x_P – длина разрыва внешнего слоя индуктора; R_{II} – радиус внутреннего слоя индуктора; R_{I2} – радиус внешнего слоя индуктора; R_2 – радиус заготовки; $T_{ПЦ}$ – температура поверхности центрального сечения заготовки.

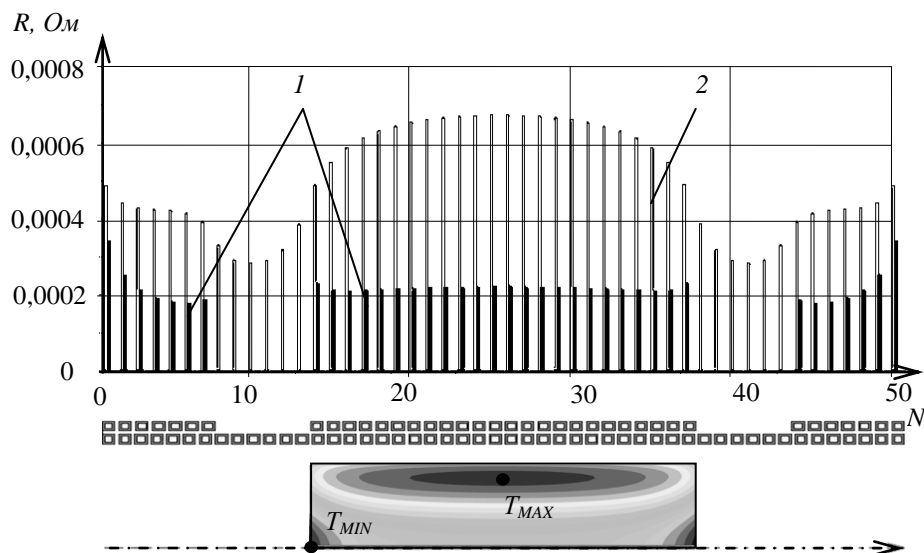


Рис. 3. Распределение сопротивлений по виткам двухслойного индуктора и температурное поле помещенной в него заготовки из титанового сплава ВТ6 длиной 500 мм и диаметром 275 мм на частоте 100Гц
(1) – наружный слой; (2) – внутренний слой

такой модели возможен такой выбор конструкции индукционного нагревателя, при котором потери энергии в индукторе будут минимальны.

В пятой главе разрабатывается численная модель комплекса комбинированного нагрева «индукционные нагреватели – печи сопротивления» для нагрева заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра и производится оптимизация конструкции индукционного нагревателя и режимов работы комплекса комбинированного нагрева с целью повышения энергоэффективности и производительности.

Для обеспечения прецизионного нагрева титановых сплавов необходимо обеспечивать не только скоростной нагрев с контролем и архивацией технологического режима термической обработки металла, но и предельно достижимую для конкретных заготовок точность распределения температурного поля в объеме заготовки. Так как требуемые по технологии отклонения температур по объему заготовок различной длины и диаметра недостижимы при нагреве в одном индукторе, то дополнительно к индукционному нагреву применяется выдержка заготовки в печи сопротивления. Для реализации поставленной задачи используется численная комбинированная модель «индукционные нагреватели- печи сопротивления».

Нагрев в индукционном нагревателе продолжается до тех пор, пока температура, измеряемая пирометром, расположенным над поверхностью заготовки в центральном сечении, меньше установленной температуры. При достижении заданной температуры заготовка выгружается из индуктора и транспортируется в печь сопротивления. За время транспортирования за счет теплопроводности и тепловых потерь с поверхности заготовки значения температур поверхности и центра заготовки приближаются друг к другу, и температурное распределение по сечению заготовки становится более однородным. В печи сопротивления производится термостатирование, во время которого температура поверхности достигает заданной температуры нагрева, и создается необходимое температурное распределение по всему объему заготовки. Таким образом, гарантируется требуемая точность нагрева.

Для исследования комплекса комбинированного нагрева дополнительно к модели индукционного нагревателя была разработана модель печи сопротивления, совместное решение которых позволило тщательно изучить и сравнить различные режимы работы комплекса и провести оптимизацию конструкции индукционного нагревателя.

Работа комплекса включает в себя следующие технологические ограничения:

1. Напряжение на индуктор $U_{II} \leq U_{II \max}$;
2. Температура точки на поверхности центрального сечения заготовки должна быть больше температуры любой другой точки на поверхности заготовки $T_{II}(\frac{L_2}{2}) = T_{II \max}$. Условие присутствия точки с максимальной температурой в середине заготовки при наличии пирометра, измеряющего температуру данной точки, гарантирует контроль за неперевышением температуры заготовки из титанового сплава температуры полиморфных превращений. При этом неизменным условием является симметричное расположение заготовки в индукторе;
3. Время выдержки заготовки в печи сопротивления $t_{ПС}$ не должно превышать $t_{ПС \max}$. Несоблюдение данного условия ведет к повышенному окислению и уменьшению выхода годного;
4. Время нагрева заготовки в индукторе t_{II} не должно превышать $t_{II \max}$;
5. Задача определения минимума функционала $F(x)$ решается для определенного диапазона длин и диаметров заготовок в пределах $L_{2 \min} \dots L_{2 \max}$ для длины и $D_{2 \min} \dots D_{2 \max}$ для диаметра соответственно.

Мощность индукционного нагревателя и время нагрева на первом этапе зависит от конкретных размеров заготовки и выбирается из условия обеспечения максимальной энергоэффективности работы устройства в целом. Кроме того, оптимизация функционала затрат энергии $\min F(x) = F_{II}(x) + F_{ПС}(x)$ показала, что для каждой заготовки с конкретными геометрическими размерами существуют оптимальные значения величин разрывов наружного слоя индуктора, при которых затраты энергии в комплексе при нагреве данной заготовки будут минимальны (рис. 4). Для оптимизации конструкции по критерию энергосбережения с учетом нагрева заготовок различной длины и диаметра в одном индукционном нагревателе необходимо учитывать производственный план предприятия, и в зависимости от доли нагреваемых заготовок определенной длины и диаметра в общей массе используемых типоразмеров определяется оптимальная конструкция нагревателя и выбор оптимального режима нагрева.

При нагреве N титановых заготовок одного диаметра и длины в комплексе комбинированного нагрева затраты энергии определяются по формуле:

$$W_N = N \cdot W_{II} + t_{ПС} \cdot W_T + N \cdot W_{ТС},$$

где W_{II} - затраты энергии на предварительный нагрев в индукторе; $t_{ПС}$ - время окончательного нагрева в печи сопротивления; W_T - потери энергии через футеровку печи сопротивления; $W_{ТС}$ - теплосодержание одной заготовки в печи сопротивления. Каждая заготовка нагревается в отдельном индукторе, окончательная выдержка всех заготовок осуществляется в одной печи сопротивления. В печи сопротивления могут быть размещены от 1 до 8 заготовок.

Картина распределения $F(x)$ в зависимости от мощности индуктора представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что нагрев $N \leq 2$ заготовок в комплексе комбинированного нагрева по критерию энергосбережения является более выгодным по сравнению с нагревом только в печи сопротивления, энергоэффективность нагрева $N = 4$ заготовок зависит от режима нагрева и конструкции индуктора (наиболее подходящим является ускоренный режим нагрева в индукторе с разрывами), а нагрев $N = 8$ заготовок в комплексе является менее выгодным с точки зрения энергосбережения.

Несмотря на это, одно из основных требований к технологии нагрева титановых заготовок – ограничение по времени нахождения нагретой заготовки в печи сопротивления $t_{ПС}$ не более 2 часов – не выдерживается при использовании для процесса нагрева только печи сопротивления (см. табл. 2). Кроме этого,

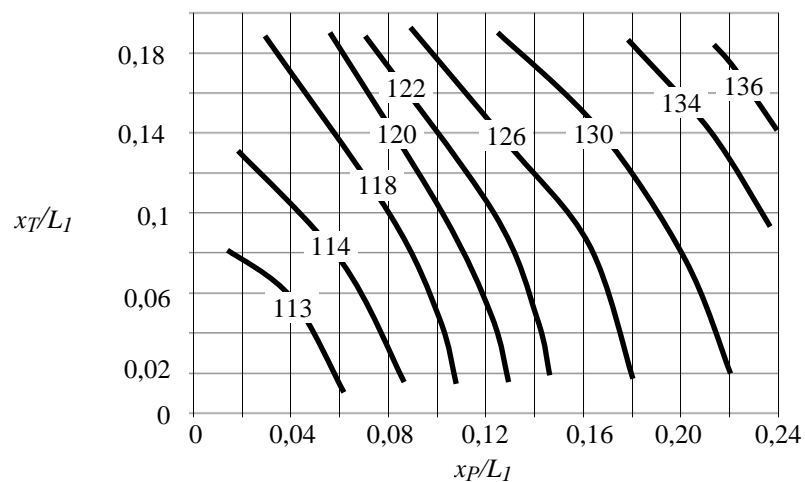
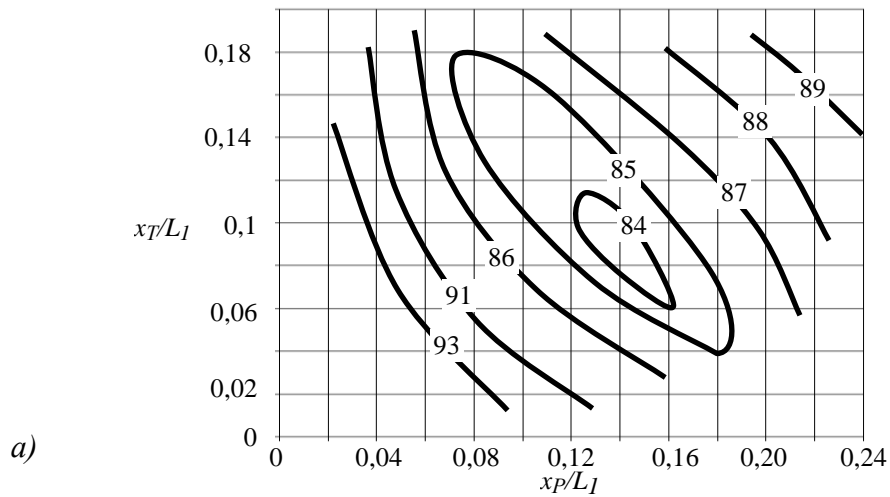


Рис. 4. Линии уровня $F(x)$ в плоскости параметров x_p и x_T при $R_2/R_{11}=0,76$

a) при $L_2/L_1=0,38$; б) при $L_2/L_1=0,72$

производительность нагрева в комплексе комбинированного нагрева «ИН+ПС» почти в два раза выше, чем при использовании только печи сопротивления ПС. Для достижения той же производительности необходимо увеличивать число печей сопротивления, что влечет за собой увеличение занимаемых площадей и в условиях недостатка рабочего пространства вынуждает использовать более компактный комплекс «ИН+ПС».

Таблица 2

Кол-во заг-к, N, шт	Время нагрева, час				Затраты энергии, кВт·ч				$\Delta W/W_{ПС}, \%$
	ПС	ИН+ПС			ПС	ИН+ПС			
	$t_{ПС}$	$t_{ПС}$	$t_{И}$	t	$W_{ПС}$	$W_{ПС}$	$W_{И}$	W	
1	3,2	1,63	0,24	1,89	165,6	67,6	46,7	114,3	31
2	3,2	1,63	0,24	1,89	204	72,6	93,4	166	18,6
4	3,2	1,63	0,24	1,89	280,5	83,2	186,8	270	10,5
8	3,2	1,63	0,24	1,89	433,7	102,9	373,6	476,5	-10

$F(x)$, кВт·ч

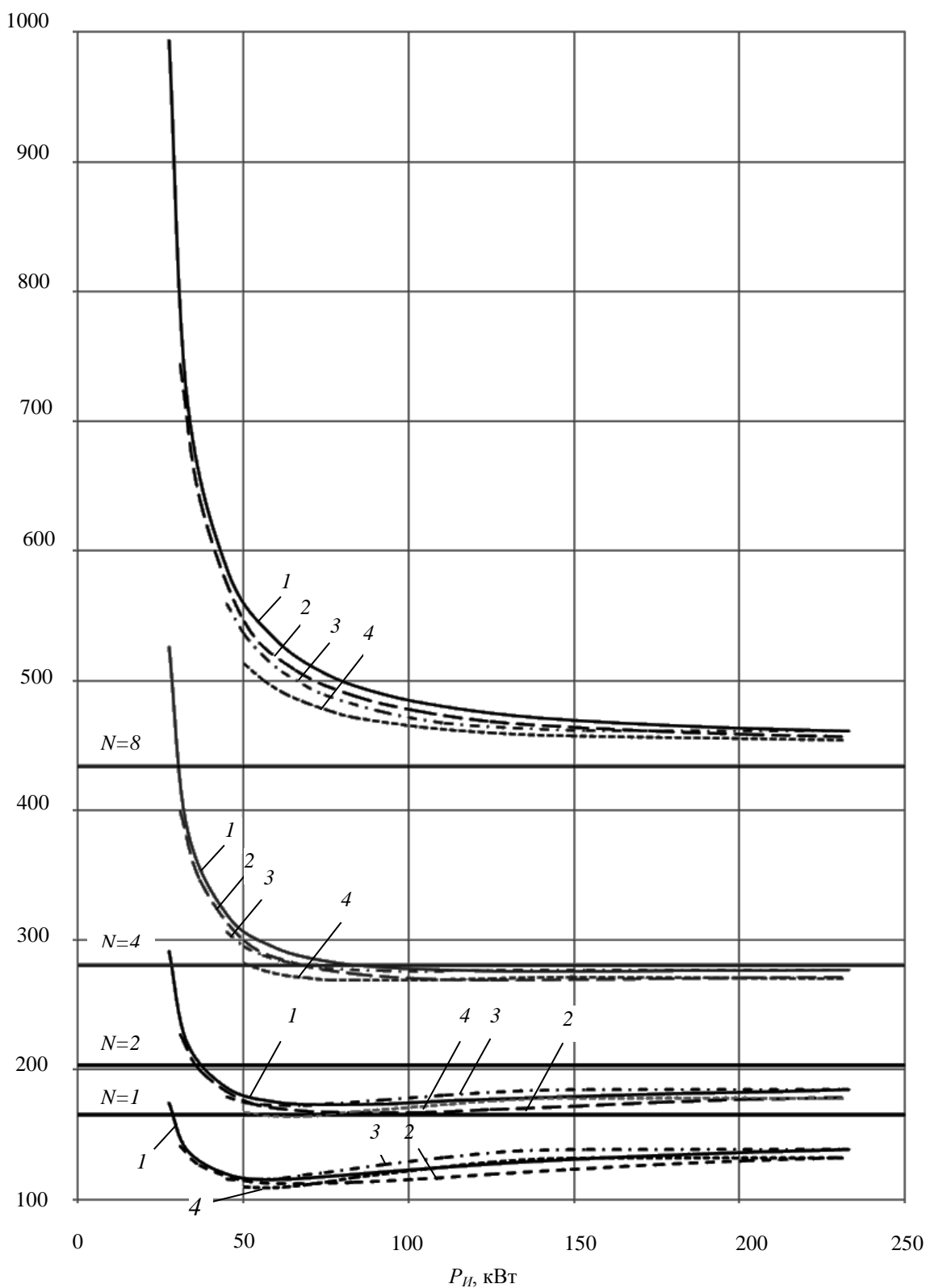


Рис. 5 Кривые зависимости $F(x)$ при нагреве N штук титановых заготовок длиной 750 мм и диаметром 275 мм

1,2 - при одной мощности индуктора; 3,4 - при ускоренном нагреве;

1,3 – индуктор без разрывов; 2,4 – индуктор с разрывами

Таким образом, можно утверждать, что индукционный способ нагрева заготовок из титановых сплавов перед обработкой давлением может быть использован для достижения распределения температурного поля по объему заготовки в пределах не менее $\pm 15 - 20^{\circ}\text{C}$. Для получения роторного качества металлов, где перепад температуры составляет $\pm 5-10^{\circ}\text{C}$ по всему объему заготовки целесообразно использовать разработанный комбинированный способ нагрева в комплексе «индукционные нагреватели – печи сопротивления». Автоматизация комплекса индукционного оборудования и средств подачи заготовок к индукторам, печам сопротивления и к прессу осуществляется автоматизированным комплексом индукционного оборудования (АКИО), который обеспечивает организацию и улучшение деятельности процесса прессования и его информационное сопровождение, обеспечивающее прослеживаемость процесса прессования заготовок и паспортизацию продукции. Использование результатов исследования в комплексе комбинированного нагрева позволяет получить качественный прецизионный нагрев заготовок из титановых сплавов с высокой энергоэффективностью и производительностью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработка численной модели устройства комбинированного нагрева «индукционный нагреватель – печь сопротивления», обеспечивающего прецизионный нагрев при обеспечении максимальной производительности работы установки;
2. Разработка модели индукционного нагревателя для нагрева цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра;
3. Разработка способа индукционного нагрева цилиндрических заготовок из титановых сплавов различной длины и диаметра;
4. Разработка математической модели индукционного нагревателя для оценки электрических потерь витков многослойного индуктора;
5. Использование модели «индукционный нагреватель - ТПЧ» для оценки влияния изменения частоты нагревательного контура вследствие изменения параметров загрузки на качество нагрева;
6. Исследование режимов работы комплекса и оптимизация конструкции индукционного нагревателя по критерию энергосбережения и производительности;
7. По результатам исследований получен патент РФ на полезную модель №106480 и патент РФ на полезную модель №107439;
8. Использование полученных результатов в установке комбинированного нагрева титановых заготовок перед пластической деформацией на предприятии ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК:

1. Григорьев, Е.А. Моделирование электромагнитных и температурных полей при периодическом индукционном нагреве цилиндрических немагнитных заготовок [Текст] / Е.А. Григорьев, В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко, И.И. Растворова, П.А. Масликов // Индукционный нагрев. – 2010. - №4, С.13-18.
2. Григорьев, Е.А. Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия [Текст] / Е.А. Григорьев, В.Б. Демидович, П.А. Масликов, И.И. Растворова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. - №2, С.53-59.

3. Григорьев, Е.А. Влияние на качество нагрева в одном индукторе заготовок различной длины и диаметра [Текст] / Е.А. Григорьев, В.Б. Демидович, П.А. Масликов // Индукционный нагрев. – 2011. - №16, С. 22-26

Патент на полезную модель:

4. Григорьев, Е.А. Индуктор для нагрева мерных заготовок [Текст]: пат. 106480 Рос. Федерация: МПК H05B 6/36 / Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Растворова И.И.; заявитель и правообладатель ГОУВПО «СЗТУ». - №2011109591/07; заявл. 14.03.2011; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19 – 1 с.: ил.

5. Григорьев Е.А. Индуктор для периодического нагрева цилиндрических титановых заготовок различной длины [Текст]: пат. 107439 Рос. Федерация: МПК H05B 6/36 / Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Растворова И.И.; заявитель и правообладатель ГОУВПО «СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». - №2011112341/07; заявл. 31.03.2011; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22 – 2 с.: ил.

Другие публикации:

6. Григорьев, Е.А. Энергосберегающие технологии прецизионного нагрева легких сплавов в индукторах [Текст] / Е.А. Григорьев [и др.] // Материалы 2-й международной конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева АРИН-09».-СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – С.48 –57.

7. Grigoriev, E., Demidovich, V., Chmilenko, F., Nikitin, V., Olenin, V., Electromagnetic processing of titanium alloys before plastic deformation (Электромагнитная обработка титановых сплавов перед пластической деформацией) [Текст] / E. Grigoriev, V. Demidovich, F. Chmilenko, V. Nikitin, V. Olenin // 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM-2009, Dresden, 2009 –P.181-184.

8. Grigoriev, E., Demidovich, V., Maslikov, P., Rastvorova, I., Olenin, V., Precise heating of the cylindrical billets in the stage inductor heaters (Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия) [Текст] / E. Grigoriev, V. Demidovich, P. Maslikov, I. Rastvorova, V. Olenin // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10, Padua, 2010. – P.123-124.

9. Grigoriev, E., Demidovich, V., Maslikov, P., Rastvorova, I., Precise heating of the cylindrical billets in the stage induction heaters (Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия) [Текст] / E. Grigoriev, V. Demidovich, P. Maslikov, I. Rastvorova // 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components ICEEE-2010, Alushta, 2010, - P.123

10. Григорьев, Е.А. Особенности индукционного нагрева титановых сплавов [Текст] / Е.А. Григорьев [и др.] // Материалы международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011», Екатеринбург, 2011. – С.111 –116.

11. Grigoriev, E., Demidovich, V., Maslikov, P., Rastvorova, I., Olenin, V., Precise induction heating of Ti and Zr billets (Прецизионный индукционный нагрев титановых и циркониевых заготовок) [Текст] / E. Grigoriev, V. Demidovich, P. Maslikov, I. Rastvorova, V. Olenin // Heat Processing – 2011. - №3, P.266-270

12. Григорьев Е. А. Энергоэффективный комплекс комбинированного нагрева «индукционные нагреватели – печи сопротивления» [Текст] / Е.А. Григорьев // Материалы международного молодежного форума «Энергоэффективные электротехнологии», Санкт-Петербург, 2011, - С. 31-32

13. Григорьев Е. А. Оптимизация конструкции индукционного нагревателя периодического действия для нагрева заготовок из титановых» [Текст] / Е.А. Григорьев // Материалы международного молодежного форума «Энергоэффективные электротехнологии», Санкт-Петербург, 2011, - С. 47-48.