

На правах рукописи



Оленин Владимир Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНДУКЦИОННЫХ
СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО НАГРЕВА ДЛИННОМЕРНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность: 05.09.10– Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

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

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Демидович Виктор Болеславович

Официальные оппоненты –

доктор технических наук, профессор Дресвин С. В.

кандидат технических наук, доцент Злобина М. В.

Ведущая организация – Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Центральный Научно - Исследовательский Институт Конструкционных Материалов «ПРОМЕТЕЙ» (г.Санкт-Петербург).

Защита состоится "27" ноябре 2009 г. в 15.30 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 "26" октябре 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций

к.т.н, доцент



М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний момент в период мирового экономического кризиса в России особое внимание уделяется стратегически важным отраслям промышленности, в частности, связанным с авиакосмическим комплексом.

Традиционным для авиастроения материалом является титан и его сплавы. В нашей стране лидером в поставке титана и единственным предприятием полного цикла его обработки является ОАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА", г. Верхняя Салда. Основные потребители выпускаемой продукции это отечественные и зарубежные производители аэрокосмической техники (ОАО "Компания "Сухой", Boeing, Airbus). В сегодняшних условиях для сохранения имеющегося рынка сбыта требуется постоянное увеличение качества выпускаемой продукции и уменьшение издержек производства. В связи с этим происходит модернизация производственного комплекса с применением энергосберегающих технологий и приобретением нового наукоемкого оборудования.

Одним из этапов модернизации производства является увеличение использования в процессах нагрева индукционного оборудования. Это объясняется рядом общеизвестных преимуществ, таких как: хорошие энергетические показатели, высокая скорость нагрева, отсутствие контакта между индуктором и металлом, простота управления процессом, возможность полной автоматизации, небольшие габариты установок, легкость механизации и обслуживания, в том числе, при пуске, остановке и смене номенклатуры изделий.

В отличие от нагрева сталей нагрев титана имеет ряд особенностей связанных с физико-химическими свойствами материала (низкой теплопроводностью, малым удельным весом и т.д.) и с высокими требованиями потребителей к качеству продукции в соответствии с международными и национальными стандартами авиапрома. Для обеспечения предъявляемых требований необходимо использование прецизионного нагрева ($\pm 20^\circ\text{C}$ по объему), а нагревательное устройство должно проходить проверку на обеспечение технологической точности нагрева.

В данной ситуации применение традиционных способов индукционного нагрева часто бывает неприемлемым и требуется разработка новых технологий и оборудования предусматривающего прецизионный нагрев титановых изделий.

Целью работы является разработка и внедрение индукционных систем прецизионного нагрева длинномерных заготовок из титановых сплавов.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

1) Анализ существующих типов устройств индукционного нагрева (УИН) длинномерных цилиндрических заготовок с возможностью организации прецизионного нагрева.

2) Разработка численной модели устройства индукционного нагрева с возможностью исследования нестационарных режимов работы оборудования;

3) Исследование нового способа индукционного нагрева длинномерных изделий с применением возвратно – поступательных движений нагреваемой заготовки;

4) Разработка и внедрение индукционных систем для прецизионного нагрева длинномерных заготовок из титановых сплавов;

5) Разработка методики проверки устройства индукционного нагрева на технологическую точность нагрева заготовок.

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 численная модель устройства индукционного нагрева с учетом динамики перемещения заготовки в индукторах при организации нагрева с возвратно-поступательным движением изделия.

2) Предложен новый способ индукционного нагрева длинномерных цилиндрических изделий с организацией возвратно-поступательных движений нагреваемой заготовки в индукторах, обеспечивающий прецизионный нагрев.

3) Найдена зависимость распределения температурного поля по длине изделия от параметров системы перемещения в устройства индукционного нагрева с организацией возвратно-поступательного движений нагреваемых заготовок.

4) Разработана методика проверки на технологическую точность устройства индукционного нагрева с применением возвратно-поступательных движений заготовки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Численная модель УИН с возможностью исследования нестационарных режимов работы при возвратно-поступательном движении нагреваемой заготовки.

2) Способ индукционного нагрева длинномерных цилиндрических изделий с организацией возвратно-поступательных движений нагреваемой заготовки в индукторах.

3) Зависимость распределения температурного поля по длине заготовки от параметров системы перемещения в УИН с организацией возвратно-поступательного движений нагреваемых заготовок.

4) Методика проверки на технологическую точность УИН с применением возвратно-поступательных движений заготовки.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Применение нового способа индукционного нагрева с возвратно – поступательным движением заготовок позволяет организовать периодический нагрев длинномерных заготовок индукционным способом с равномерным рас-

пределением температурного поля по длине заготовки, а также обеспечить режим термостатирования заготовок в установках полунепрерывного действия.

2. Разработанная численная модель позволяет выполнить расчет индукционных нагревателей с возвратно – поступательным движением заготовки с учетом параметров системы перемещения.

3. Методика проверки УИН на технологическую точность позволяет по результатам измерения температуры длинномерных заготовок в четырех точках сделать вывод о максимальном отклонении температуры от заданной по всему объему нагреваемого изделия.

4. Внедрение в титановое производство индукционного нагревателя с организацией возвратно-поступательных движений заготовки позволило повысить производительность и качество нагрева изделия 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 (2004 – 2009), на симпозиуме “Молодые ученые – промышленности северо-западного региона” (СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2004), на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2006), на 4-ой международной конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века» (ВНИИМЕТМАШ, Москва, 2008), на XVI международной конференции «Electricity Applications in Modern World» (UIE, Краков, 2008), на 2-ой международной конференции АРИН-09 «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» (СПбГЭТУ, Санкт-Петербург, 2009).

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 10 работах, среди которых 1 работа в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых в действующем перечне ВАК, 4 – статьи в специализированных журналах, 6 работ – в материалах международной конференции. По результатам научных исследований получен патент РФ на изобретение №2333618 «Способ индукционного нагрева длинномерных изделий».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 58 наименований и одного приложения. Работа изложена на 113 листах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 4 таблицы.

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 показаны особенности нагрева заготовок из титановых сплавов, сформулирована проблема обеспечения качества нагрева индукционным способом, выявлены пути ее решения и сформулированы задачи исследования.

Операции нагрева широко применяются в производстве титановых изделий. Особенности нагрева титана и его сплавов связаны с полиморфизмом материала, его химической активностью в диапазоне высоких температур и особенными тепло- и электрофизическими свойствами. Непременным условием обеспечения качества титановой продукции является высокая точность распределения температурного поля по объему заготовки (до ± 20 °С), исключение перегрева металла и минимизация времени процесса нагрева. Также немаловажным фактором при выборе способа нагрева является возможность адаптации нагревательной системы к существующему производству.

Наиболее полно соответствует требуемым условиям индукционный способ нагрева. Основные недостатки, ограничивающие применение индукционного нагрева в титановом производстве, связаны с трудностями формирования равномерного температурного поля, обусловленными низкой теплопроводностью титана, высоким уровнем тепловых потерь и характером распределения источников тепла.

Как известно из теории оптимального управления процессом индукционным нагревом, при двухинтервальном управлении предельные отклонения температуры по сечению ε_{inf} в одномерном случае достигаются при условии равенства температур на поверхности и в центре заготовки $T_{\text{п}} = T_{\text{ц}}$. Температурный максимум T_{max} находится на некоторой глубине от поверхности. Характер изменения температурного поля по сечению цилиндрической заготовки в процессе индукционного нагрева заготовок иллюстрирует рис. 1.

На рис. 2а приведена зависимость ε_{inf} от диаметра и температуры заготовки, полученная по 1D-модели при постоянной частоте нагрева 1000 Гц. На рис. 2б показана зависимость ε_{inf} от величины заглубления заготовки в индуктор – σ , при стационарном нагреве в одном индукторе по 2D-модели. Материал заготовки титановый сплав – ВТ6, длина – 750 мм, частота нагрева – 1000 Гц. Предельные отклонения температуры по всему объему заготовки достигаются при условии равенства температур в трех точках по длине и по сечению заготовки $T_{\text{п}}=T_{\text{ц}}=T_{\text{з}}$, где $T_{\text{з}}$ – температура на торце заготовки. Учет конечной длины заготовки и индуктора, также как наличие или отсутствие торцевых крышек сильно влияет на предельно достижимые кондиции нагрева.

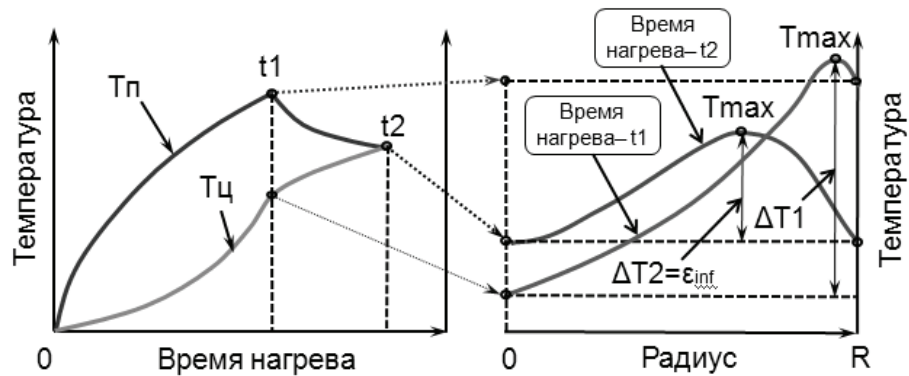


Рис.1. Характер распределения температурного поля по радиусу заготовки в процессе индукционного нагрева.

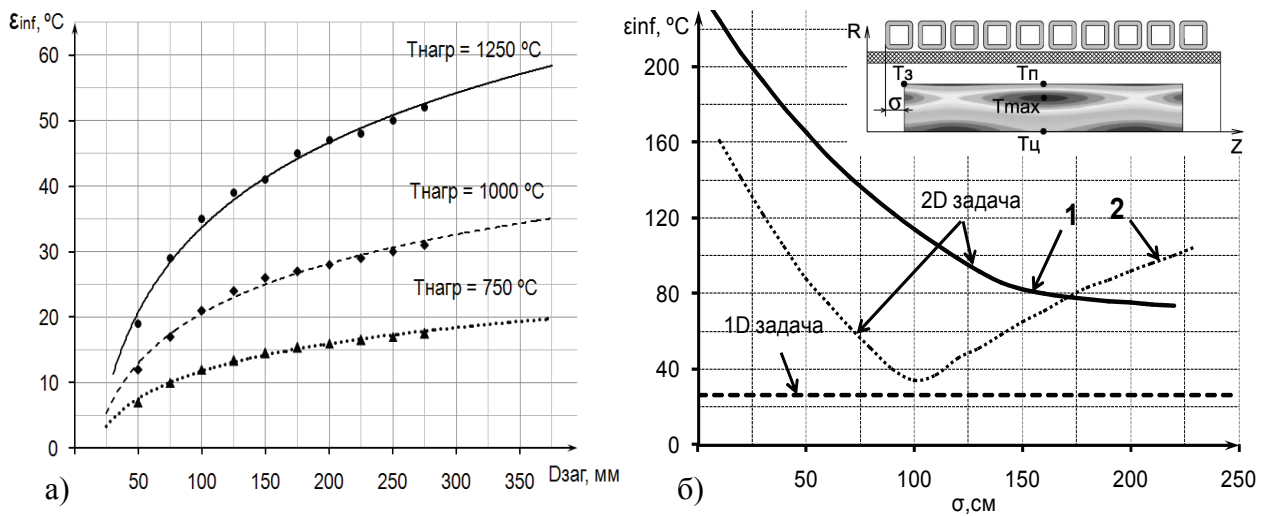


Рис.2. Зависимость предельной погрешности нагрева от диаметра заготовки (а) и от величины заглубления заготовки в индуктор (б):
1 - без торцевых крышек, 2 - с торцевыми крышками

Кроме параметров заготовки (длина, диаметр, материал) и параметров нагревательной системы (температура нагрева, частота, мощность) на погрешность формирования температурного поля большое влияние оказывает способ реализации нагрева.

Основные типы индукционных нагревателей разделяется по способу перемещения заготовки и представлены на рис. 3. Наилучшим по достижению предельной равномерности является периодический способ нагрева в одном индукторе. Такой способ подходит для заготовок небольшой длины, но для длинномерных заготовок он нереализуем из-за затруднения перемещения заготовки внутри катушки индуктора. Кроме того, при этом способе нагрева изделие, весь процесс располагается на жаропрочных направляющих, подстуживающих низ заготовки и искажающих ее температурное поле.

Наиболее удобным по организации движения длинномерных заготовок является непрерывный способ индукционного нагрева. В этом случае транспортировка заготовок через зону индукторов осуществляется с помощью привод-

ных роликов, установленных между индукторами, подача заготовок в нагреватель носит непрерывный характер, каждая последующая заготовка упирается в торец предыдущей, создавая единый столб.

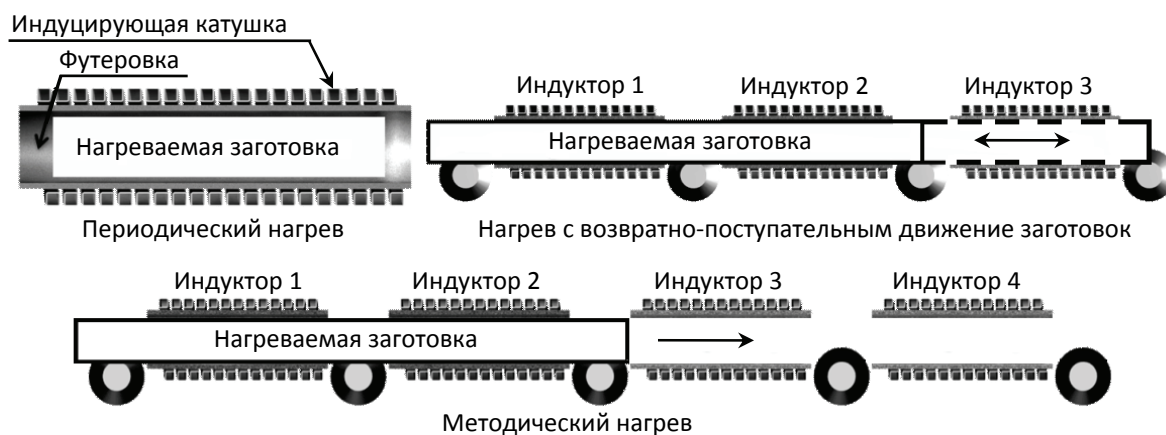


Рис. 3. Схемы индукционных нагревательных систем

Однако при нагреве длинномерных заготовок непрерывным способом возникает проблема неравномерного остывания по длине заготовки на выходе из нагревателя, когда часть изделия находится под работающими индукторами, часть на открытом воздухе.

Для исключения остывания длинномерных заготовок к зоне основного нагрева необходимо добавлять зону термостатирования (термостат), которая будет компенсировать тепловые потери с поверхности заготовки. Добавление термостата значительно увеличивает габариты установки и усложняет процесс управления нагревом.

Исходя из проведенного анализа следует, что для обеспечения прецизионного нагрева длинномерных цилиндрических заготовок из титановых сплавов требуется создание нагревателя с роликовой системой перемещения и нагревательной частью обладающей характеристиками индуктора периодического действия.

К таким системам относится нагреватель с организацией возвратно-поступательных движений нагреваемых заготовок в нескольких индукторах. Схема индукционного нагревателя с организацией возвратно-поступательных движений заготовок изображена на рис. 3.

Предложенная схема легко вписывается в существующую технологическую линию производства титановых изделий, позволяет уменьшить габариты нагревателя, обеспечить транспортировку длинномерных заготовок через зону нагрева, но для достижения требуемых температурных полей необходимо проектирование систем с использованием численного моделирования.

Во второй главе рассмотрены методы численного моделирования индукционных нагревателей, подробно описана модель индукционного нагревательного комплекса, разработанная в среде Universal 2D, для численного расчета индукционной системы с организацией возвратно-поступательных движений нагреваемого изделия.

В модели используется комбинированный метод расчета индукционных нагревателей, когда задача делится на внешнюю (расчет входных параметров индукторов и поля вне загрузки) и внутреннюю (расчет распределения электромагнитного и температурного поля в загрузке). Принцип построения электротепловых моделей в среде Universal 2D представлен на рис. 4.



Рис.4. Принцип построения электротепловых моделей в среде Universal 2D

Внешняя задача решается на базе метода интегральных уравнений (МИУ), а внутренняя на базе метода конечных разностей (МКР). Сшивание задач происходит на поверхности заготовки с постановкой импедансных граничных условий, позволяющих не рассматривать поле внутри тела.

Простейшая осесимметричная индукционная система, состоящая из индуктора и нагреваемого тела, на поверхности которого известен поверхностный импеданс, представлена на рис. 5.

Поверхностный импеданс или сопротивление единичного квадрата \dot{Z}_0 , равно отношению тангенциальных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей:

$$\dot{Z}_0 = \dot{E} / \dot{H}_t . \quad (1)$$

Значение \dot{Z}_0 в любом элементе поверхности тела в общем случае изменяется в процессе нагрева.

На основе определения поверхностного импеданса, закона электромагнитной индукции и закона Био-Савара для элементов нагреваемого тела Q с осевым размером l_Q и радиусом R_Q получаем:

$$Q \in T; \quad \sum_P (j\omega M_{QP} - \dot{Z}_Q N_{QP}) \dot{I}_P = 0 \quad (2)$$

Здесь $\dot{Z}_Q = 2\pi \dot{Z}_{0Q} R_Q / l_Q$ – поверхностное сопротивление кольцевого элемента Q , N_{QP} – безразмерный коэффициент, связывающий МДС на участке Q с током элемента P . Коэффициент N_{QP} является аналогом взаимной индуктивности M_{QP} .

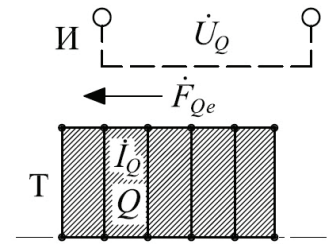


Рис. 5. Расчетная схема индукционной системы

Для элементов индуктора запишем уравнение равновесия напряжений по второму закону Кирхгофа:

$$Q \in I; \quad r_Q I_Q + \sum_P j\omega M_{QP} I_P = U_Q. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют полную систему уравнений, описывающую индукционное устройство (см. рис. 5)

В результате внешнего электрического расчета при заданном напряжении на выводах индуктора, либо токе или мощности в цепи, определяются основные электрические параметры системы: полная активная мощность, полная реактивная мощность, активная мощность, выделяющаяся в заготовке, мощность потерь в индукторах, токи в индукторах, электрический КПД нагревателя, распределение напряженности магнитного поля на поверхности заготовки.

Цель решения внутренней электротепловой задачи – определение распределения температуры в объеме заготовки при определенных граничных условиях на поверхности, которые задаются или из условия свободного теплообмена с окружающей средой, или с учетом теплоизоляции. Одновременно рассчитываются общие тепловые потери и распределение температуры внутренней поверхности теплоизоляции по длине нагревателя.

Внутренние электромагнитная и тепловая задачи в поперечном сечении заготовки описываются системой дифференциальных уравнений

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\rho R \frac{\partial \dot{H}}{\partial R} \right) = j\omega \mu \mu_0 \dot{H}; \quad (4)$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\lambda R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + q \quad (5)$$

где \dot{H} – комплексное действующее значение напряженности магнитного поля;

T – температура; q – внутренние источники теплоты, $q = \rho \left| \frac{\partial \dot{H}}{\partial R} \right|^2$; ρ – удельное

сопротивление; μ – относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/см; ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$; C_v – объемная теплоемкость; λ – удельная теплопроводность.

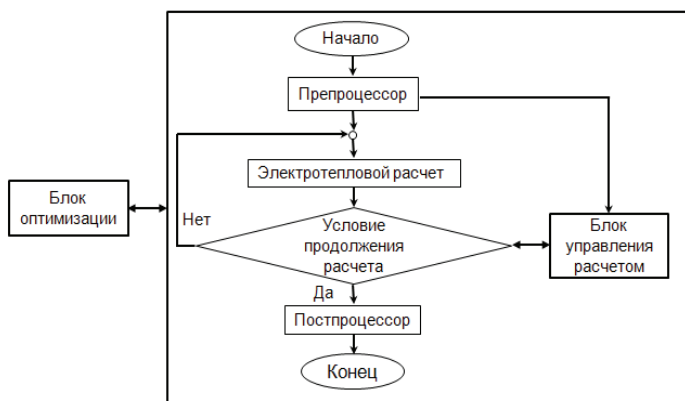


Рис. 6. Общая функциональная схема электротепловых моделей индукционных нагревателей в среде Universal 2D

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.

Общая функциональная схема электротепловой модели индукционных нагревателей, реализованная в среде Universal 2D, пред-

ставлена на рис. 6. Эта схема включает в себя несколько основных блоков. Основным характерным отличием данной модели является наличие блока управления расчетом, который определяет внешние воздействия на систему нагрева и систему перемещения нагревателя. Частным случаем использования блока управления расчетом является организация возвратно-поступательных движений заготовки в процессе нагрева. Блок управления задает направление, скорость и время движения заготовки в рамках одной стадии. Алгоритм нагрева заготовки с организацией возвратно-поступательных движений, использованный в модели индукционного нагревателя, изображен на рис. 7. Кроме внешнего управления движением заготовки происходит также управление по температуре нагрева.

В третьей главе на основе разработанной математической модели исследована установка индукционного нагрева с организацией возвратно-поступательных движений заготовок.

Особенностью исследуемой системы является условное разделение нагревателя на несколько повторяющихся участков с одинаковым распределением внешних источников тепла. Таким образом, за один цикл покачивания каждая точка заготовки проходит через зону нагрева, равную длине индуктора, и зону остывания, равную расстоянию между индукторами.

В ходе анализа системы и по результатам численного моделирования было выявлено, что для создания участков с одинаковым распределением внешних источников тепла необходимо выполнение следующих условий: одинаковые геометрические параметры всех индукторов (длина, диаметр, количество витков, параметры футеровка), одинаковое расстояние между индукторами, равенство величины амплитуды покачивания сумме длины индуктора и расстоянию между индукторами, одинаковое значение тока в индукторах в процессе нагрева.

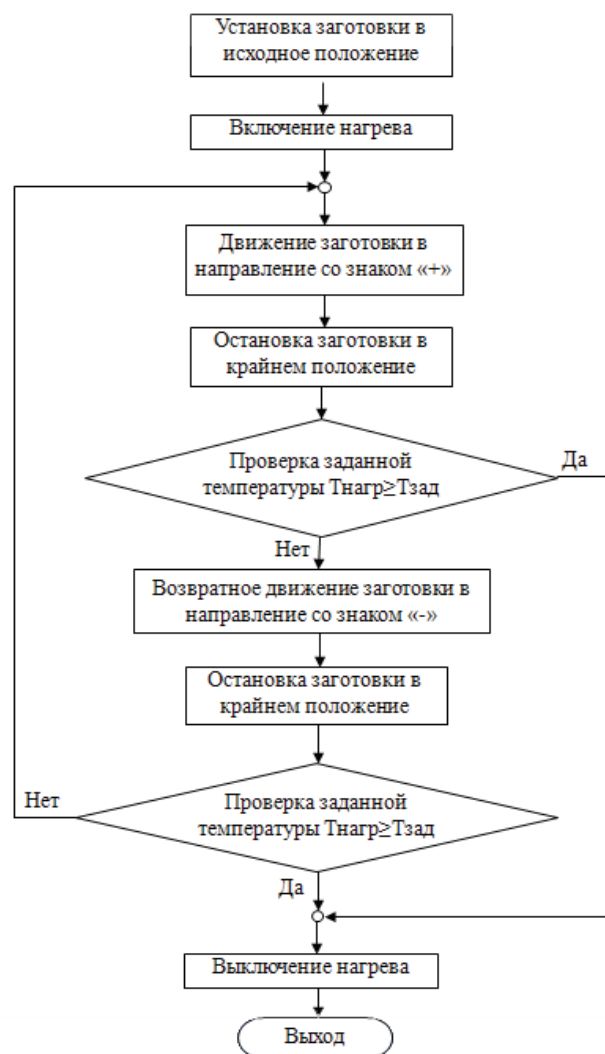


Рис. 7. Алгоритм индукционного нагрева заготовки с организацией возвратно-поступательных движений

Соблюдая эти условия, мы получаем предельную равномерность нагрева по длине заготовки, при этом значение температурного перепада в процессе перемещения заготовки сильно меняется. На рис. 8 изображено распределение температуры по длине на поверхности заготовки в течение одного цикла «качания»: а - в момент начала цикла возвратно – поступательного движения, б - в процессе перемещения заготовки между крайними положениями, в - в момент окончания цикла возвратно-поступательного движения.

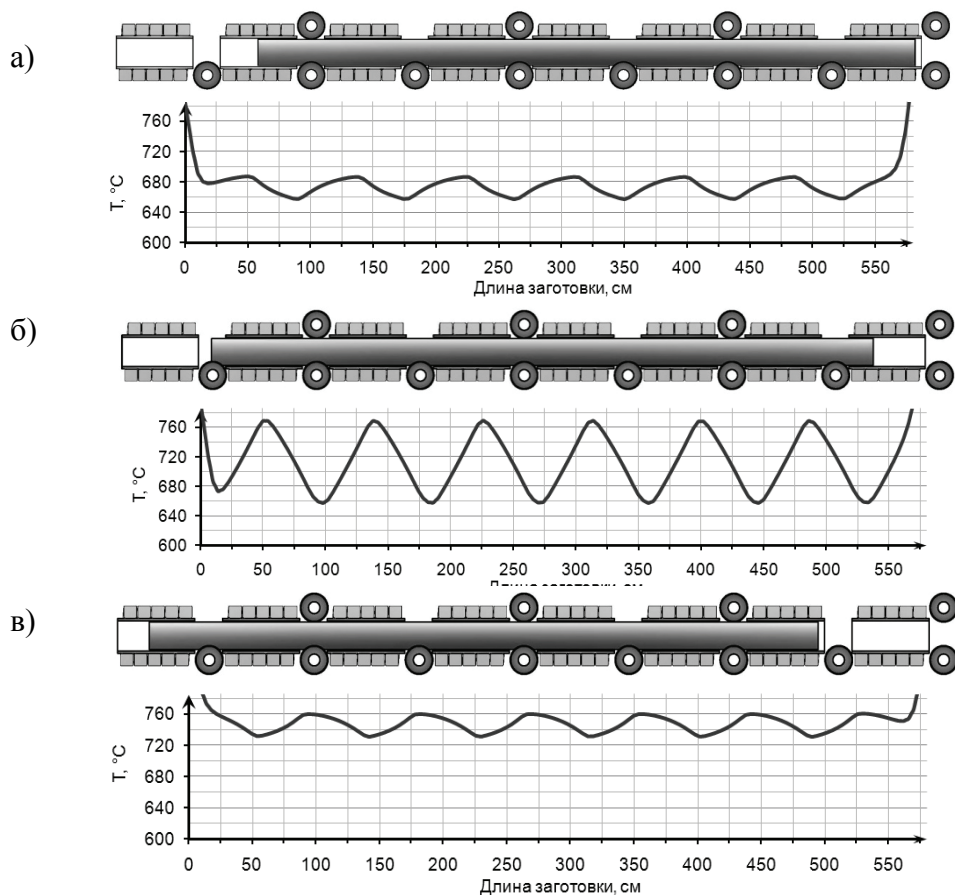


Рис. 8. Распределение температурного поля по длине заготовки в процессе одного цикла покачивания

Одинаковое значение тока в индукторах в процессе нагрева достигается путем стабилизации работы источников питания по току. В случае стабилизации питания по напряжению режим, максимально приближенный к стабилизации тока, может быть получен путем применения последовательной схемы соединения всех индукторов. Последовательная схема позволяет сделать электрические параметры УИН в меньшей степени зависимыми от изменения величины заполнения индукторов заготовкой в процессе качания.

При параллельном соединении индукторов неравномерность распределения мощности источника питания между последовательными группами создает неодинаковое распределение внешних источников тепла. Неравномерность нагрева при параллельном подключении индукторов может достигать $150\text{ }^\circ\text{C}$, тогда как при последовательном соединении неравномерность составляет около $20\text{ }^\circ\text{C}$. Для сравнения на рис. 9. представлено распределение температурного

поля по длине заготовки для различных схем подключения индукторов. Расчеты проведены для заготовки из сплава ВТ6, диаметром -120 мм, длиной 5800 мм до конечной температуры 750 °С. Количество индукторов - 8шт. выбиралось из возможности нагрева заготовки максимальной длины и типичной в данном случае длине индуктора.

В реальных условиях на ускорение и остановку системы приводов в момент реверсирования заготовки затрачивается определенное время. Это время было введено в модель индукционной системы, как некоторая временная остановка или задержка заготовки в момент смены направления движения на противоположное. Влияние любой задержки может быть скомпенсировано за счет изменения амплитуды покачивания. Анализ полученных данных позволил ввести учет времени задержки через простую формулу:

$$L_{амплитуда} = L_{инд} + L_{зазор} - t_3 * V \quad (6)$$

где t_3 – время остановки привода при реверсировании заготовки, с; V – скорость движения заготовки при осуществлении возвратно-поступательных движений.

Рис. 10 демонстрирует данные полученные в результате моделирования подтверждающие достоверность этой формулы для разных скоростей перемещения заготовки в режиме стабилизации тока, в режиме стабилизации напряжения эти значения будут отличаться.

В четвертой главе рассматриваются особенности конструкции нагревателя, особенности алгоритма нагрева длинномерных заготовок, описан метод проверки работы оборудования на технологическую точность и представлены данные, полученные в ходе горячих испытаний оборудования на заводе ОАО “Корпорация ВСМПО-АВИСМА”.

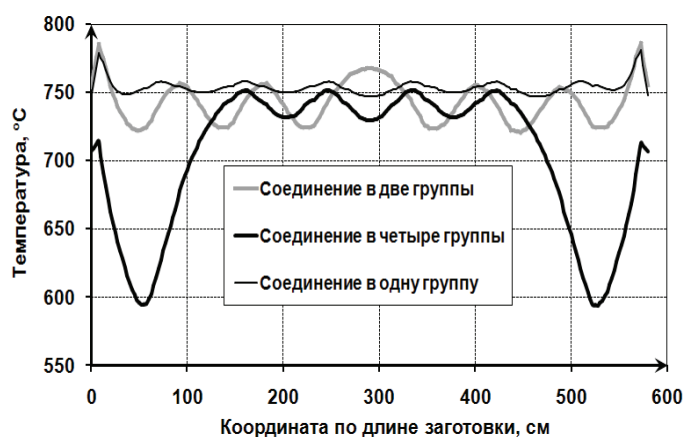


Рис.9. Распределение температурного поля по длине заготовки в зависимости от схемы подключения индукторов

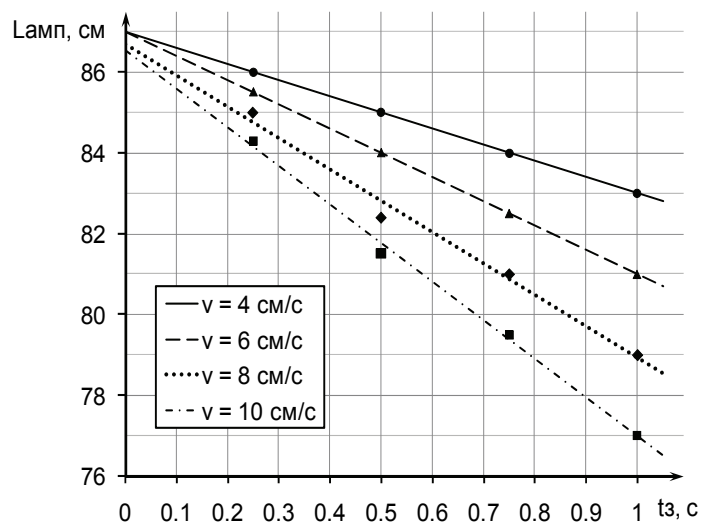


Рис. 10. Зависимость оптимальной амплитуды покачивания заготовки от времени задержки на реверс при различных скоростях движения

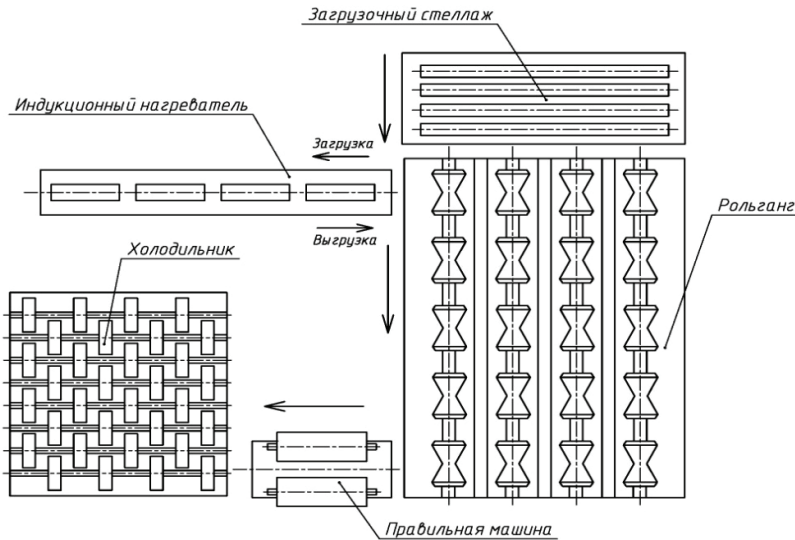


Рис.11. Технологическая схема процесса правки.

готовка выгружается обратно и затем происходит процесс правки с последующим равномерным охлаждением на “холодильнике”. Диаметр заготовок варьируется от 60 до 120 мм, длина от 2000 до 5800 мм, материал заготовок – сплавы титана.

Схема индукционного нагревателя представлена на рис. 12. Индукционный нагреватель состоит из 8 одинаковых индукторов, длиной $L_{\text{инд}} = 530$ мм каждый, расположенных с межиндукторным зазором $L_{\text{заз}} = 350$ мм. Между индукторами расположены 7 роликов, связанных с электроприводом движения. Ролики имеют общий вал, приводимый в движение асинхронным электродвигателем, питающимся от преобразователя частоты, что позволяет регулировать скорость движения прутка в пределах 4 – 20 см/с; минимальное время остановки на реверс направления движения было установлено равным 0,5 с.

Контроль амплитуды движения прутка осуществлялся двумя оптическими датчиками перемещения. Каждый датчик имеет открытый оптический канал, перекрытие которого в момент прохода торца прутка позволяет фиксировать этот момент.

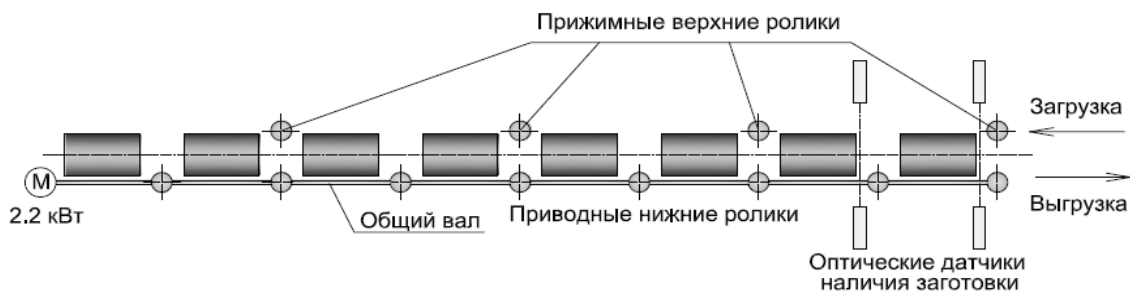


Рис.12. Схема индукционной установки для нагрева заготовок из сплавов титана с организацией возвратно-поступательных движений

По результатам численного моделирования была спроектирована и изготовлена индукционная система для нагрева цилиндрических титановых заготовок перед правкой. Технологическая схема процесса правки изображена на рис. 11.

“Холодная” заготовка с загрузочного стеллажа поступает на рольганг, с которого загружается в индукционный нагреватель. После нагрева “горячая” за-

Питание индукционной системы осуществлялось тиристорным преобразователем частоты серии ТПЧ мощностью 400кВт, частотой 1000Гц, выходным напряжением 800В. Все индукторы соединялись между собой последовательно. Частота, мощность источника питания, рабочее напряжение и время нагрева выбирались по известным правилам для решения задачи сквозного нагрева цилиндрических заготовок заданной геометрии до заданной температуры.

Исходя из условий равномерного нагрева были выбраны следующие параметры системы: $L_{\text{инд}} = 530$ мм, $L_{\text{заз}} = 340$ мм, $t_{3 \text{ min}} = 0,5$ с, $\vartheta = 4$ см/с, амплитуда качания прутка 830мм.

Для диаметров заготовок 50-80 мм нагрев осуществлялся в одну стадию, при неизменном значении мощности источника питания. Для диаметров заготовки 80-120 мм нагрев выполнялся в две стадии: первая стадия – нагрев на максимальной мощности (установке напряжения генератора). Вторая – нагрев с пониженной мощностью для выравнивания температуры по сечению и уменьшения градиента температуры за один цикл качания в конце нагрева.

Выключение нагрева и переключение между стадиями осуществлялось только после прохождения заготовкой полного цикла качания для создания равных условий нагрева каждой точки по длине заготовки.

В процессе экспериментов были реализованы два альтернативных способа определения момента переключения на вторую стадию и выключение нагрева: управление по пирометру и управление по затраченной энергии.

Периодический характер распределения температурного поля по длине заготовки позволяет определить расстояние между точками по длине, где достигается максимальная разница температур. Расстояние между этими точками по длине заготовки равняется приблизительно половине амплитуды возвратно-поступательных движений заготовки. Для проверки устройства индукционного нагрева длинномерных заготовок на технологическую точность минимальное количество термопар должно равняться четырем. Расстояние по длине заготовки между термопарами должно быть равно половине амплитуды возвратно-поступательных движений, при этом одна термопара должна располагаться в центре заготовки, одна в глубине на заранее просчитанной точке нахождения температурного максимума.

Для исследования динамики изменения и конечного распределения температуры по сечению и длине прутка в процессе нагрева, были изготовлены специальные образцы длиной 4010 мм, диаметром 100 мм. Температура записывалась с интервалом 1 мин в течение всего времени нагрева равного 15мин.

Схема размещения термопар для проверки теплоперепада по длине заготовки с полученными экспериментальными данными представлены на рис. 13 и в табл. 1. Термопары К1, К4, К6, К5 расположены на глубине 50 мм, К2, К3, К5, К7 – на глубине 10 мм.

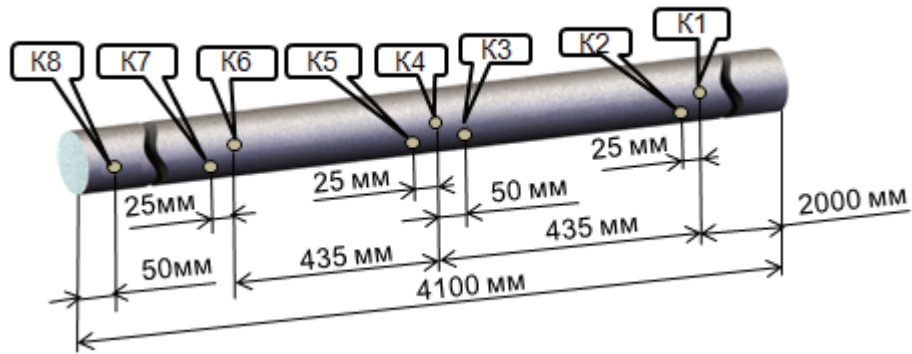


Рис.13. Схема установки термопар по длине заготовки

Таблица 1

Время нагрева, с	Температура в точках контроля							
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_5, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$t_7, ^\circ\text{C}$	$t_8, ^\circ\text{C}$
10	18	18	21	21	20	17	18	17
70	21	75	22	21	21	22	72	18
130	50	80	22	21	22	50	78	23
190	70	99	33	26	28	70	92	30
250	101	139	136	60	102	100	120	60
310	126	234	236	101	125	128	213	107
370	212	329	311	115	269	205	313	189
430	334	409	391	260	368	327	400	339
490	415	490	460	374	448	407	476	432
550	489	553	529	458	524	484	544	517
610	557	617	583	530	587	552	608	595
670	613	666	634	599	647	615	663	657
730	667	718	683	656	702	667	712	714
790	713	749	721	709	743	718	750	759
850	742	761	741	741	762	747	762	761

Проведенные эксперименты на разработанной и внедренной промышленной установке показали, что достигается высокая точность нагрева - отклонение конечной температуры по объему прутка от требуемой не более, чем на 20°C . Эта точность является предельно достижимой для изделий данного диаметра, когда неравномерность по длине прутка не превышает неравномерность по сечению прутка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработка численной модели устройства индукционного нагрева с возможностью исследования нестационарных режимов работы оборудования
2. Разработан и исследован способ индукционного нагрева длинномерных изделий с организацией возвратно-поступательных движений заготовок, обеспечивающий прецизионный нагрев по длине и сечению заготовки.
3. Разработан алгоритм управления нагревом длинномерных изделий с организацией возвратно-поступательных движений заготовки.
4. Выявлена зависимость равномерности индукционного нагрева с организацией возвратно-поступательных движений заготовок от параметров привода системы, даны рекомендации по выбору амплитуды покачивания для уменьшения этой зависимости.
5. Проведены экспериментальные исследования разработанной системы и способа индукционного нагрева длинномерных заготовок с организацией возвратно-поступательных движений заготовки.
6. Разработаны рекомендации и методика проверки УИН с организацией возвратно-поступательных движений на технологическую точность нагрева.
7. По результатам исследований получен патент Российской Федерации №2333618 «Способ индукционного нагрева длинномерных заготовок», дата опубликования 10.09.2008.
8. Внедрена установка индукционного нагрева с возвратно-поступательным движением заготовок перед правкой на предприятие ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Внедрение подтверждено актом о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК:

1. Оленин, В.А. Индукционные установки для нагрева длинномерных цилиндрических заготовок перед обработкой давлением [Текст] / В.А. Оленин, В.Б. Демидович, Б.Н. Никитин // Электротехнология. – 2007. - №9. - С. 31-37.

Патент на изобретение:

2. Способ индукционного нагрева длинномерных заготовок [Текст]: пат 2333618 Рос. Федерация: МПК H05B 6/02 / Демидович В.Б., Оленин В.А., Чмиленко Ф.В.; заявитель и правообладатель ФГУП ВНИИТВЧ им. В.П.Вологодина. - № 2006141071/09; заявл. 20.11.2006; опубл. 10.09.2008, Бюл. №25 – 5 с.: ил.

Другие публикации:

3. Оленин, В.А. Автоматизированная индукционная нагревательная установка для подогрева длинномерных заготовок [Текст] / В.А. Оленин, В.И.

Кубышкин, Ф.В. Чмиленко // Политехнический симпозиум 2004 - СПб.: ГОИ ВПО СПбГПУ, 2004. – С. 54 – 55.

4. Оленин, В.А. Опыт разработки и наладки системы управления установки прецизионного индукционного нагрева [Текст]/ В.А. Оленин [и др.]. // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Екатеринбург 2006. - С. 144-148.

5. Оленин, В.А. Индукционные установки для прецизионного нагрева длинномерных заготовок [Текст]/ В.А. Оленин и // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Екатеринбург 2006. - С. 437-441.

6. Olenin, A., Demidovich, V., Nikitin, B., Induction installations for heating long cylindrical billets before metal forming (Индукционные установки для нагрева длинномерных цилиндрических заготовок перед обработкой давлением) [Текст]/ A. Olenin, V. Demidovich, B. Nikitin // Russian Metallurgy – 2007 - №8, С.98-102.

7. Оленин, В.А. Индукционный нагрев длинномерных заготовок [Текст] / В.А. Оленин, В.Б. Демидович, Б.М. Никитин // Индукционный нагрев.– 2007. -№1. - С. 2-8.

8. Оленин, В.А. Индукционные установки для нагрева титановых заготовок перед пластической деформацией [Текст] / D – Metallurgia XXI века. Сборник трудов 4-й международной конференции молодых специалистов. – М.: ВНИИМЕТМАШ им. академика А.И.Целикова, 2008, с. 302-311.

9. Olenin, V., Demidovich, V., Nikitin, B., Utilization of Induction Heating In the Titanium Industry (Применение индукционного нагрева в титановой промышленности) [Текст]/ V. Olenin, V. Demidovich, B. Nikitin // XVI International UIE Conference on Electricity Applications in Modern World, Krakov, 2008 - P.51-52.

10. Оленин, В.А. Индукционный нагрев титановых заготовок перед обработкой давлением [Текст] / В.А. Оленин, В.Б. Демидович, Б.М. Никитин // Индукционный нагрев. - 2008. - №3/ - С. 20-25.

11. Оленин В.А. Энергосберегающие технологии прецизионного нагрева легких сплавов в индукторах [Текст]/ В.А. Оленин [и др.] // Материалы 2-й международной конференции «АРИН 09». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – С.48-57.