

На правах рукописи



**ПАВЛУШИН Алексей Владимирович**

**ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВА ПОД  
ИНДУКЦИОННУЮ ЗАКАЛКУ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель:

**ПЛЕШИВЦЕВА Юлия Эдгаровна,**

доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты:

**ДУШИН Сергей Евгеньевич,**

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», профессор кафедры «Автоматика и процессы управления».

**ЛЕПЕШКИН Александр Роальдович,**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Защита состоится 14 декабря 2023 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу: <http://d21221707.samgtu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), тел.: (846) 278-44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
24.2.377.04 (Д 212.217.07),  
к.т.н., доцент



Е. Е. Ярославкина

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Одной из ключевых задач в машиностроительном производстве является повышение надежности и увеличение срока службы ответственных деталей, к которым относятся стальные втулки, специальные подпятники, валы, шестерни и другие металлические полуфабрикаты сложной геометрической формы. Для этого на предприятиях различных отраслей промышленности широко используются современные технологии термической обработки, к которым относится поверхностная индукционная закалка, применяемая для обеспечения достаточной твердости поверхностного слоя детали в сочетании с необходимой упругостью ее сердцевины путем изменения микроструктуры металла.

Поверхностная индукционная закалка заключается в скоростном нагреве детали до требуемой температуры выше точки Кюри, выдержке (при необходимости) при этой температуре для образования однородной аустенитной микроструктуры и интенсивном охлаждении со скоростью, обеспечивающей формирование мартенситной микроструктуры. К основным преимуществам индукционной заправки относятся скоростной нагрев локальной зоны заготовки, отсутствие окисления и обезуглероживания, гибкое управление процессом, экологическая безопасность и энергоэффективность и др.

Высокое качество заправки достигается за счет обеспечения в конце стадии нагрева однородной микроструктуры поверхностного слоя, зависящей от равномерности температурного распределения в нем при отсутствии локальных перегревов и недопустимых термонапряжений по всему объему заготовки. Трудности решения этой задачи многократно возрастают для упрочняемых изделий сложной формы с угловыми и труднодоступными зонами, в которых недопустимые температурные перепады становятся основным фактором, способным вызвать неоднородность мартенситной структуры. Решение описанных нетривиальных проблем позволит получить однородную микроструктуру, обеспечивающую требуемую твердость поверхностного слоя, снизить растягивающие эквивалентные нагрузки, которые могут привести к образованию микротрещин, что существенно улучшает качество ответственных деталей в соответствии с постоянно возрастающими технологическими требованиями, предъявляемыми к ним. В этой связи особую важность приобретает задача оптимизации конструктивных параметров индукторов и технологических режимов их работы.

### **Степень разработанности темы исследования**

Основы теории оптимального управления системами с распределенными параметрами (СРП), в том числе оптимизации температурных режимов индукционного нагрева заложены в работах А.Г. Бутковского, В.С. Немкова, Ю.В. Егорова, Э.Я. Рапопорта, В.Б. Демидовича, Л.С. Зимина, М.Ю. Лившица, А.И. Данилушкина, А.С. Васильева и др. Большой вклад в решение проблемы оптимального проектирования индукторов внесли исследования А.И. Алиферова, П. Ди Барбы, М. Форзана, А.Н. Никанорова, Б. Наке, Д. Запаты, Т. Мэйнарда, С.А. Галунина, Э. Бааке, Т. Леука, С. Наджи, Г.Н. Рогачева и др.

Проблемам моделирования процессов индукционного нагрева металла с учетом термонапряжений посвящены работы С.А. Яицкова, П.М. Чайкина, Ю.И. Сосинова,

М.Я. Смелянского, Н.Д. Морозкина, В. Андре, Р.П. Хичке, А.Б. Кувалдина, А.Р. Лепешкина, С.Е. Коршикова и других отечественных и зарубежных ученых.

Диссертационная работа Попова А.В. посвящена решению задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностной индукционной закалки цилиндрических заготовок с учетом ограничений на максимально допустимую температуру. Однако, в работе не рассматриваются принципиальные проблемы, связанные с закалкой заготовок сложной формы, и не исследуются возникающие при этом термические напряжения, учет которых обязателен из-за критически возрастающей неравномерности нагрева.

Несмотря на имеющийся научный задел, вопросы оптимального проектирования индукторов и управления режимами нагрева применительно к технологии индукционной закалки изделий сложной формы разработаны недостаточно, что обуславливает актуальность темы диссертационного исследования, его научную и практическую значимость.

**Объект исследования:** процесс поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы.

**Предмет исследования:** алгоритмы управления и конструктивные характеристики индукционной установки для нагрева деталей сложной геометрической формы под поверхностную закалку.

**Целью диссертационной работы** является повышение качества поверхностной закалки деталей сложной геометрической формы путем обеспечения максимально равномерного нагрева упрочняемого слоя при отсутствии в нем локальных перегревов и превышения пределов допустимых термических напряжений на основе совместной оптимизации алгоритмов управления и конструкции индуктора.

Для достижения указанной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка в ППП ANSYS Mechanical APDL нелинейных двумерных моделей процессов индукционного нагрева и охлаждения при поверхностной закалке стальных заготовок с угловой зоной для анализа и оптимизации взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, полей термических напряжений и упругопластических деформаций.

2. Разработка методики совместного решения задач оптимального проектирования и управления индукционной установкой, обеспечивающей максимально равномерное распределение температурного поля в поверхностном слое упрочняемой заготовки сложной формы по окончании стадии нагрева под поверхностную закалку с учетом технологических ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения.

3. Формулировка и разработка методики решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индуктором для поверхностной закалки ответственных деталей с целью обеспечения максимально равномерного нагрева упрочняемого слоя заготовок сложной формы.

4. Разработка методики решения задачи управления процессом индукционного нагрева на временных интервалах движения по фазовым ограничениям на максимально

допустимые температуры и термонапряжения в закаливаемом слое заготовки сложной формы.

5. Разработка оптимизационных процедур на основе предложенных методик, их программная реализация в ППП MATLAB и апробация на моделях процесса закалки стальных заготовок с угловыми зонами, разработанных в ANSYS Mechanical APDL.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории теплопроводности, электромагнетизма, механики деформируемого твердого тела, теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, численного и компьютерного моделирования.

**Работа соответствует предметной области исследования научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (пункты 4, 5, 12 паспорта специальности).**

#### **Научная новизна**

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработана общая методика совместной оптимизации проектных решений и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки, которая, в отличие от известных:

- позволяет совокупно оптимизировать конструктивные и режимные параметры индуктора для обеспечения максимально равномерного температурного распределения в упрочняемом слое деталей сложной формы,

- обеспечивает выполнение диктуемых технологическими требованиями условий отсутствия локальных перегревов и превышения допустимых термонапряжений в процессе нагрева.

2. На базе альтернативного метода оптимизации СРП разработаны методика и вычислительная технология решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки, в которых, в отличие от известных:

- рассматривается суммарный вектор оптимизируемых параметров повышенной размерности, представляющий совокупность векторов конструктивных и режимных параметров;

- альтернативные свойства решений задачи оптимизации СРП распространяются на температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя сложной геометрической формы, рассматриваемой в виде пространственной развертки по одной условной координате.

3. Разработана методика численного решения нелинейных задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям на максимально допустимые температуры и термонапряжения, которая, в отличие от известных, позволяет контролировать отсутствие локальных перегревов и превышение допустимых пределов термонапряжений по всему объему закаливаемого слоя заготовки сложной формы.

4. В ППП MATLAB реализованы итерационные оптимизационные процедуры, которые позволяют решать задачи совместного оптимального проектирования и управления индуктором с интеграцией численной модели взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, а также полей термических напряжений, разработанной в ANSYS Mechanical APDL.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева ответственных деталей сложной геометрической формы под поверхностную закалку с учетом технологических ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения.

2. Методика и вычислительная технология решения на основе альтернативного метода задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки ответственных деталей в условиях равномерной оценки целевого множества конечных температурных распределений вдоль границы упрочняемого слоя заготовки сложной геометрической формы.

3. Методика численного решения нелинейных задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям на максимально допустимые температуры и термонапряжения в закаливаемом слое заготовки сложной геометрической формы.

4. Численные итерационные процедуры для совместного решения задач оптимального проектирования витков индуктора и управления током индуктора, реализованные в среде ППП MATLAB с интеграцией двумерных нелинейных моделей взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, а также полей термических напряжений, разработанной в пакете ANSYS Mechanical APDL.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработанные в диссертации модели скоростного индукционного нагрева, методики решения задач совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора могут быть использованы для оптимизации широкого класса индукционных нагревательных установок в производственных электротехнологических комплексах. Предлагаемые методики и вычислительные технологии могут быть распространены на ответственные технологии термообработки широкой номенклатуры деталей различного назначения.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов обеспечивается корректным использованием методов теории теплопроводности, электромагнетизма, механики деформируемого твердого тела, оптимального управления системами с распределенными параметрами, численного моделирования. Справедливость выводов и обоснованность проектных решений и алгоритмов управления подтверждается использованием результатов диссертационной работы при:

- выполнении проекта РФФИ «Оптимальное проектирование и энергоэффективное управление взаимосвязанными электротепловыми полями и термонапряженными состо-

яниями в технологических системах индукционной закалки металлических изделий сложной геометрической формы» (№19-08-00232, 2019–2021 гг.);

- выполнении проекта РФ «Методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов в системах с распределенными параметрами при равномерных оценках целевых множеств» (№ 22–29–00180, 2022–2023 гг.);

- выполнении НИР в рамках проектной части государственного задания №0778-2020-0005 «Программа фундаментальных исследований СамГТУ в области химических наук и материаловедения» (2020–2022 гг.);

- выполнении совместных научных исследований СамГТУ и Института Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия) в 2019 и 2021 гг. в рамках программы Леонарда Эйлера Германской службы академических обменов DAAD;

- разработке технологий поверхностной индукционной закалки ответственных изделий на АО «СМЗ» и разработке программных комплексов для оптимизации и моделирования энергоэффективных режимов работы электротехнологических объектов в ГК «ИНФОПРО»;

- подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Основные положения и результаты работы представлены на международных и всероссийских конференциях: XIV Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения», КГЭУ (2019 г.); 3<sup>rd</sup> International Conference SUMMA21 (2021 г., г. Липецк); VIII международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" (2022г., г. Сочи); XXXV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» - ММТТ-35 (2022 г.); Международная научная конференция «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» Cyberphy:2022; 4<sup>th</sup> International Conference SUMMA22 (2022 г., г. Липецк). Работа по теме диссертационного исследования отмечена дипломом Министерства образования и науки Самарской области на конкурсе «Молодой ученый» в номинации «Аспирант» (2022 г.).

### **Публикации**

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 13 научных работах, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 – в изданиях, индексируемых зарубежными базами Scopus и Web of Science, 6 – в прочих изданиях и трудах конференций. В работах [1-4, 8, 12], опубликованных в соавторстве, автору принадлежит методики и алгоритмы решения задач и результаты численных расчетов. Работы [5-7, 9-11, 13] написаны единолично.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста. Основной текст содержит 73 рисунка и 14 таблиц. Библиографический список содержит 126 наименований, из них 32 — на иностранных языках и 3 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы основная цель и задачи, описаны новые научные результаты, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен обзор современного состояния проблемы исследования, представлены индукционные установки для нагрева под закалку ответственных изделий со специфическими особенностями конструктивного исполнения. Рассмотрены физические основы процессов нагрева и охлаждения при поверхностной индукционной закалке; выявлены причины, препятствующие формированию равномерного температурного распределения по объему упрочняемого слоя деталей сложной формы.

Проведен обзор исследований зарубежных и отечественных авторов, посвященных решению задач оптимального проектирования и управления электротехнологическими процессами. На основе анализа степени разработанности темы определена содержательная постановка задачи совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева заготовок сложной формы под поверхностную закалку, которая формулируется в диссертации в терминах теории управления СРП.

В качестве теоретической базы диссертационного исследования выбран альтернативный метод параметрической оптимизации СРП, который позволяет получить точное решение задачи при оценке целевых множеств конечных состояний в равномерной чебышевской метрике, соответствующей наиболее строгим технологическим требованиям.

Во **второй главе** рассмотрены современные программные пакеты для мультифизического численного анализа, среди которых в качестве инструмента моделирования выбран ППП ANSYS Mechanical APDL, обладающий наибольшими функциональными возможностями.

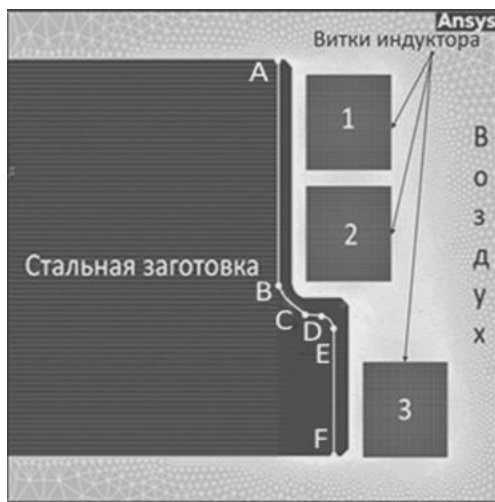
Разработан алгоритм моделирования в среде ANSYS процесса индукционной закалки, определяющий последовательность решения задач конечно-элементного анализа на стадиях нагрева и охлаждения. На основе этого алгоритма построена двумерная нелинейная осесимметричная модель взаимосвязанных электромагнитных полей, температурных полей, полей термических напряжений и упругопластических деформаций для исследования процессов индукционного нагрева под поверхностную закалку заготовки с угловой зоной (ступенчатой втулки) из типовой углеродистой стали марки С40 (рис. 1,а). Исходные данные для моделирования представлены в таблицах 1 и 2. Проведен анализ влияния типовой конструкции витков индуктора и режимов его работы на распределение температуры в поверхностном слое угловой зоны (рис. 1, б, в). Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу в процессе индукционного нагрева представлены на рисунке 2. Результаты моделирования температуры в процессе интенсивного водяного охлаждения с учетом нелинейного эквивалентного коэффициента теплоотдачи, полученного экспериментально, представлены на рисунке 3. Для подтверждения соответствия результатов моделирования известным физическим закономерностям и



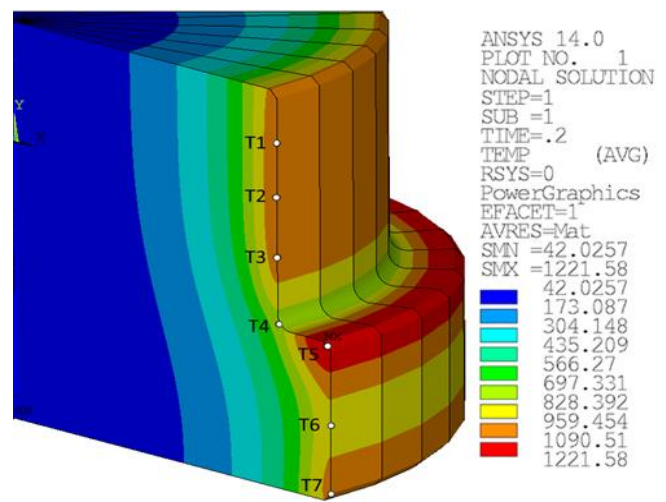
обоснования возможности их использования в оптимизационной процедуре проведена верификация модели.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования процесса нагрева

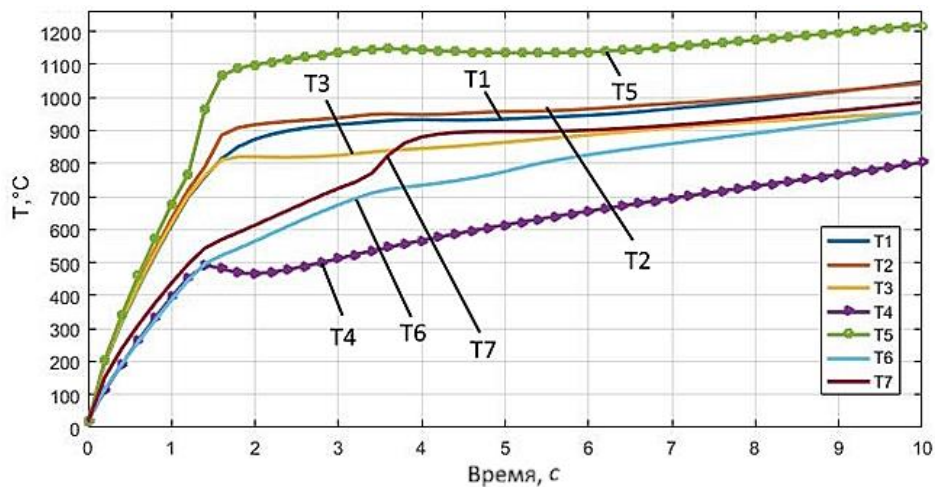
№	Наименование параметра	Значение
1.	Начальная температура заготовки, $T_a$ , °C	20
2.	Длительность стадии индукционного нагрева, $\tau^0$ , с	10
3.	Требуемая температура вдоль границы закаливаемого слоя, $T^*$ , °C	900
4.	Высота заготовки, H, мм	50
5.	Длина границы закаливаемого слоя ABCDEF стальной заготовки, L, мм	≈ 55.8
6.	Радиус заготовки R1 (верхний), мм	40
7.	Радиус заготовки R2 (нижний с выступом), мм	48
8.	Частота тока индуктора, f, кГц	50
9.	Шаг расчета модели, с	0.2
10.	Сила тока индуктора для витков № 1 и № 3, А	1432
11.	Сила тока индуктора для витков № 2, А	1832



а)



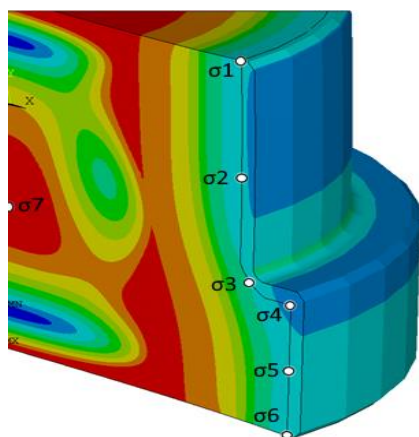
б)



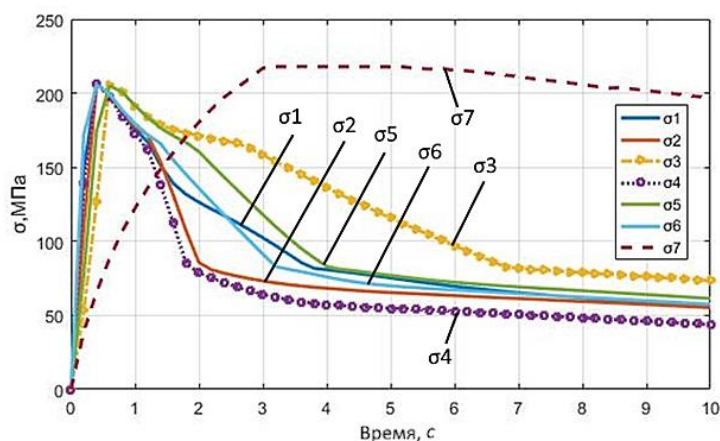
в)

а – общий вид с конечно-элементной сеткой; б – расположение характерных точек; в – зависимость температуры от времени в точках на поверхности заготовки на стадии нагрева

Рисунок 1 – Модель системы «индуктор – заготовка» с типовой формой витков в ППП ANSYS



а)



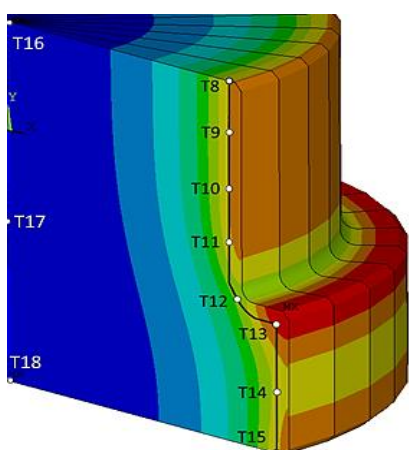
б)

а – расположение характерных точек; б – изменение термических напряжений во времени  
Рисунок 2 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в характерных точках заготовки на стадии нагрева

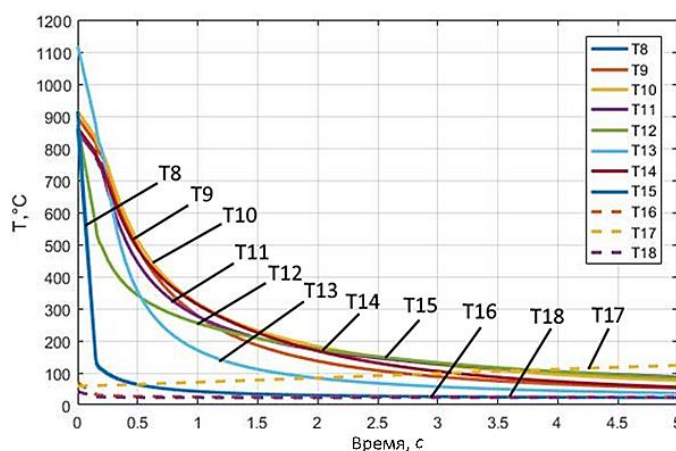
На основе результатов моделирования процесса нагрева выявлена принципиальная проблема существующей недопустимой неравномерности распределения температуры вдоль границы закаливаемого слоя заготовок сложной формы, особенно в их угловой области, при использовании типовой квадратной формы витков индуктора и типовых режимов нагрева. Таким образом, возникает необходимость решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров нагревателя и режимов его функционирования, которая является центральной в диссертационном исследовании.

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования процесса охлаждения

№	Наименование параметра	Значение
1.	Длительность стадии охлаждения, $\tau_{\text{охл}}^0$ , с	5
2.	Шаг расчета модели, с	0,05
3.	Требуемая температура детали вдоль границы закаливаемого слоя для начала мартенситного превращения, $T_{\text{охл}}^*$ , °C	350
4.	Глубина закалки поверхностного слоя, мм	2



а)



б)

а – расположение характерных точек вдоль границы закаливаемого слоя и в центре заготовки;  
б – изменение температуры во времени

Рисунок 3 – Температуры в характерных точках на стадии охлаждения

В третьей главе рассматривается постановка и общая методика решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева под поверхностную закалку ответственных стальных деталей сложной геометрической формы с учетом технологических ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения. Процесс поверхностного индукционного нагрева под закалку рассматривается как объект управления и оптимизации с распределенными параметрами (ОРП), описываемый нелинейной двумерной численной моделью, разработанной в ANSYS Mechanical APDL.

В задаче совместной оптимизации рассматривается суммарный вектор  $P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})} = (p_{\Sigma k})$ ,  $k = \overline{1, N + \tilde{N}}$  повышенной размерности  $N_{\Sigma} = N + \tilde{N}$ , представляющий совокупность векторов конструктивных  $P^{(N)} = (p_i)$ ,  $i = \overline{1, N}$  и режимных  $\tilde{P}^{(\tilde{N})} = (\tilde{p}_j)$ ,  $j = \overline{1, \tilde{N}}$  параметров индукционной установки. Температурное распределение  $T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$ , зависящее от вектора  $P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}$ , представляет управляемую функцию состояния ОРП, где  $x, y$  – пространственные координаты,  $t$  – время. Искомые параметры, включенные в вектор  $P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}$ , стеснены физически обусловленными ограничениями:

$$p_{\Sigma k \min} \leq p_{\Sigma k} \leq p_{\Sigma k \max}, k = \overline{1, N_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Технологическое требование к стадии нагрева под закалку целесообразно сформулировать в виде задания максимально допустимой величины  $\varepsilon$  абсолютного отклонения результирующего температурного распределения  $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$  вдоль границы закаливаемого слоя от заданного значения температуры  $T^*$ , где  $X$  – толщина упрочняемого поверхностного слоя,  $\tau^0$  – длительность нагрева,  $l$  – пространственная координата вдоль границы упрочняемого слоя длиной  $L$ ,  $l \in [0; L]$ .

При решении задачи совместной оптимизации используется критерий минимизации абсолютного отклонения  $\varepsilon$  в конце стадии нагрева:

$$I(P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) = \max_{P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}} |T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) - T^*| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где температуры  $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$  рассчитываются с помощью ANSYS модели.

Задача совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индукционной нагревательной установки заключается в поиске таких значений параметров  $P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})} = (p_{\Sigma 1}^{opt}, p_{\Sigma 2}^{opt}, \dots, p_{\Sigma N}^{opt})$ , стесненных ограничениями (1), которые за заданное время  $\tau^0$  обеспечат перевод ОРП, описываемого нелинейной численной двумерной ANSYS моделью, из исходного состояния в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимизации (2).

В процессе скоростного индукционного нагрева заготовки могут образоваться недопустимые по технологии локальные перегревы поверхностного слоя, поэтому при постановке задачи необходимо учитывать ограничение на максимальные допустимые значения температуры по объему поверхностного слоя вида:

$$T_{\max}(t) = \max_{x, y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) \leq T_{\text{дон}}; \quad 0 \leq t \leq \tau^0, \quad (3)$$

где  $\max_{x,y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$  – максимальная температура, определяемая в каждый момент времени на множестве  $\Omega$  точек в пределах поверхностного слоя заготовки сложной формы. Как известно из теории оптимального управления СРП, при нарушении ограничения (3), необходимо решить задачу поиска управляющего воздействия на участке  $[t_{T1}; t_{T2}]$  движения по ограничению из условия:

$$T_{\max}(t) = \max_{x,y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) = T_{\text{дон}}; \quad 0 \leq t_{T1} \leq t \leq t_{T2} \leq \tau^0, \quad (4)$$

где  $t_{T1}$ ,  $t_{T2}$  – моменты начала и окончания участка нарушения ограничения (3), определяемые по результатам решения задачи совместной оптимизации без учета этого ограничения.

Помимо образования локальных перегревов поверхностного слоя при скоростном индукционном нагреве может возникать превышение допустимых значений термических напряжений, поэтому при постановке задачи необходимо также учитывать ограничение на максимальные допустимые значения термонапряжений в закаливаемом слое:

$$\sigma_{\max}(t) = \max_{x,y \in \Omega} \sigma(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) \leq \sigma_{\text{дон}}; \quad 0 \leq t \leq \tau^0, \quad (5)$$

где  $\max_{x,y \in \Omega} \sigma(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$  – максимальное термонапряжение, определяемое в каждый момент времени на множестве  $\Omega$ . Аналогично рассмотренному выше случаю, при нарушении ограничения (5) необходимо решить задачу поиска управляющего воздействия на участке  $[t_{\sigma1}, t_{\sigma2}]$  движения по ограничению из условия:

$$\sigma_{\max}(t) = \max_{x,y \in \Omega} \sigma(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) = \sigma_{\text{дон}}; \quad 0 \leq t_{\sigma1} \leq t \leq t_{\sigma2} \leq \tau^0, \quad (6)$$

где  $t_{\sigma1}$ ,  $t_{\sigma2}$  – моменты начала и окончания участка нарушения ограничения (5), определяемые по результатам решения задачи совместной оптимизации без учета этого ограничения.

В диссертации разработана общая методика решения задачи совместной оптимизации (1)–(2) с учетом технологических ограничений (3) и (5) (рис. 4), которая предполагает случаи нарушения одного из ограничений или обоих ограничений одновременно.

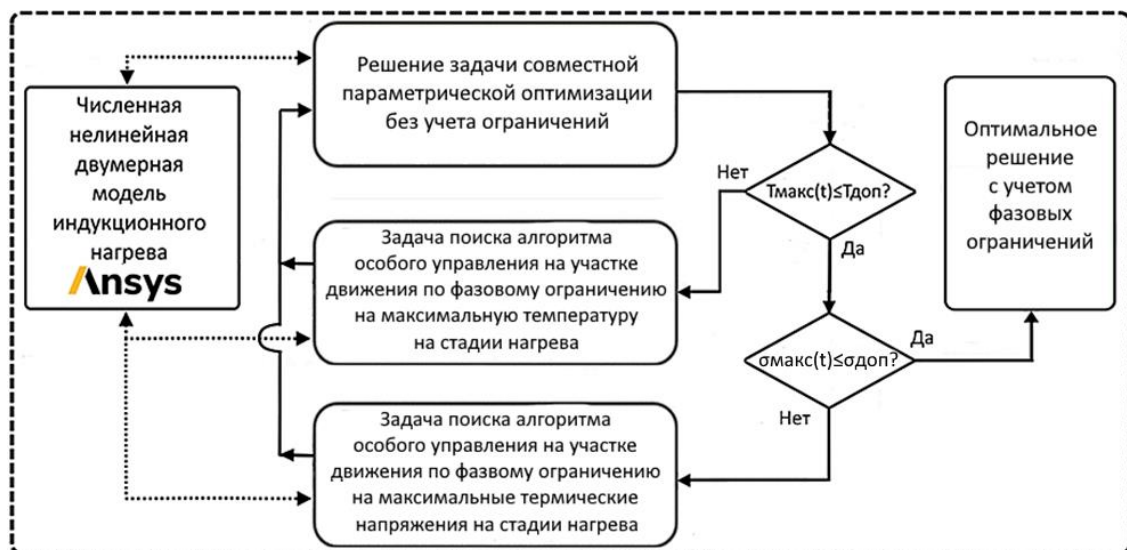


Рисунок 4 – Методика решения задачи совместной оптимизации с учетом технологических ограничений

После введения управления на дополнительных участках движения по ограничениям равномерность температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя в конце процесса нагрева снижается. Поэтому появляется необходимость повторного решения задачи совместной параметрической оптимизации проектных решений и режимов функционирования индукционной нагревательной установки с учетом найденных управляющих воздействий на участках движения по ограничениям.

Решение сформулированной задачи совместной оптимизации предлагается искать на основе альтернансного метода параметрической оптимизации СРП. Метод основан на универсальных свойствах пространственных распределений температурных полей по объему заготовки в конце оптимальных процессов индукционного нагрева, которые позволяют свести исходную оптимизационную задачу к решению системы трансцендентных уравнений, замкнутых относительно всех искомых параметров.

В теории альтернансного метода показано, что если оптимальный по критерию (2) процесс индукционного нагрева характеризуется совокупностью  $N_\Sigma$  оптимизируемых параметров, а величина минимакса  $\varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)}$  представляет собой минимальное из возможных отклонений  $\varepsilon_0$  температуры в конце процесса нагрева от заданного значения, достижимых в классе задач с  $N_\Sigma$  параметрами, то с возрастанием  $N_\Sigma$  значения минимаксов образуют убывающий ряд неравенств:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \varepsilon_{\min}^{(3)} \dots > \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)} > \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma^*)} = \varepsilon_{\text{inf}} \geq 0. \quad (7)$$

Доказано, что размерность  $N_\Sigma$  вектора параметров однозначно связана с заданным значением  $\varepsilon_0$  следующим правилом:

$$N_\Sigma = S \text{ для всех } \varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(S)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(S-1)}. \quad (8)$$

Согласно теории альтернансного метода, вдоль границы закаливаемого слоя найдутся  $M$  точек с координатами  $l_j^{\text{opt}}$ ,  $j = \overline{1, M}$ , в которых достигаются предельно допустимые отклонения температуры  $T(X, l_j^{\text{opt}}, \tau^0, P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)})$  в конце оптимальной стадии нагрева от заданного значения  $T^*$ , где  $P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)}$  - вектор оптимальных параметров, полученный в результате решения задачи совместной оптимизации. При этом температурные отклонения  $T(X, l_j^{\text{opt}}, \tau^0, P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)}) - T^*$  равны по величине  $\varepsilon_0$  и чередуются по знаку в двух соседних точках  $l_j^{\text{opt}}$ . Число  $M$  точек  $l_j^{\text{opt}}$ ,  $j = \overline{1, M}$  всегда равно или больше числа  $N_\Sigma$  оптимизируемых параметров. В случае, когда  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)}$ , между значениями  $N_\Sigma$  и  $M$  существует зависимость, определяемая выражением  $M = N_\Sigma + 1$ . Сказанное позволяет записать систему уравнений для поиска оптимальных значений параметров, составляющих вектор  $P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} T(X, l_j^{\text{opt}}, \tau^0, P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)}) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, \quad j = \overline{1, M}, \\ \frac{\partial T(X, l_m^{\text{opt}}, \tau^0, P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)})}{\partial l} = 0; \quad m = \overline{1, M_1 < M}; \\ P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)} = (P_{\Sigma 1}^{\text{opt}}, P_{\Sigma 2}^{\text{opt}}, \dots, P_{\Sigma N}^{\text{opt}}), \quad \psi = \pm 1; \quad 0 \leq l_1^{\text{opt}} < l_2^{\text{opt}} < \dots < l_M^{\text{opt}} \leq L; \\ M = \begin{cases} N_\Sigma, & \text{if } \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma-1)} \\ N_\Sigma + 1, & \text{if } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)} \end{cases} \end{array} \right. \quad (9)$$



В диссертации представлена методика численного решения нелинейных задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям (3) и (5) на максимально допустимые температуры и термонапряжения в закаливаемом слое заготовки сложной формы для различных возможных типовых вариантов их нарушения.

В **четвертой главе** предложена общая схема реализации оптимизационных процедур в программном комплексе в ППП MATLAB (рис. 5). Описаны численные процедуры решения задачи совместной оптимизации конструктивных и режимных характеристик индукционной нагревательной системы и задачи поиска управления процессом нагрева на участках движения по ограничениям. Подробно описана интеграция двумерной нелинейной модели, разработанной в пакете ANSYS Mechanical APDL, в численные процедуры. Решение системы трансцендентных уравнений, составленной на основе альтернансного метода, и определение управления на каждом временном шаге интервала движения по ограничению, реализовано с помощью стандартных функций MATLAB.

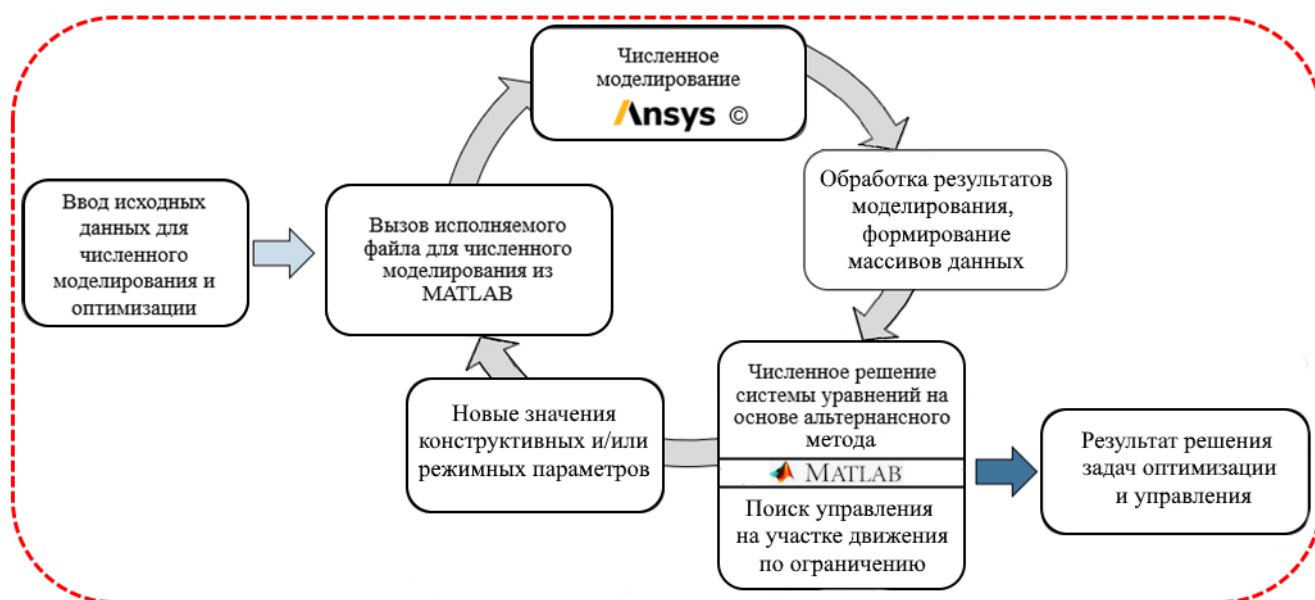
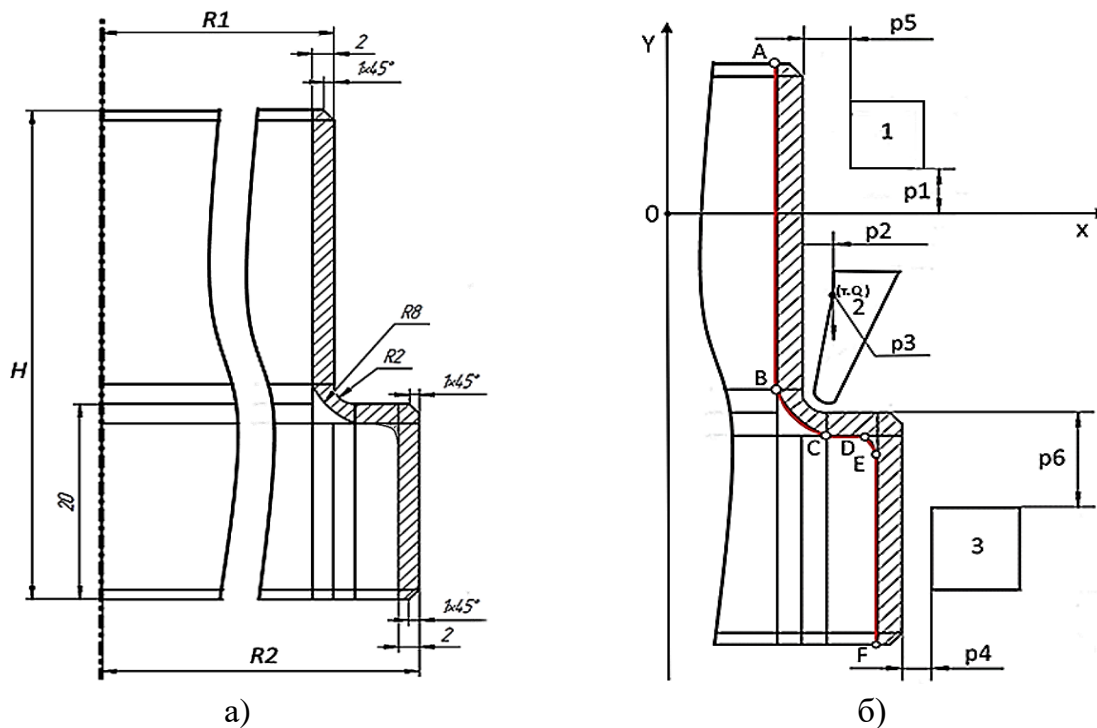


Рисунок 5 – Общая схема численных оптимизационных процедур в программном комплексе

В **пятой главе** разработанные методики и алгоритмы апробированы на примере численного решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции витков и алгоритма управления током индуктора для получения максимально равномерных температурных распределений в поверхностном слое стальной заготовки с угловой зоной (рис. 6, а) по окончании стадии индукционного нагрева под закалку с учетом технологических ограничений (3) и (5).

Для решения задачи формируется вектор  $P^{(6)}$  оптимизируемых конструктивных характеристик (рис. 6, б):  $p_1$  – расстояние между витком 1 и координатой  $Y=0$ ;  $p_2$  – координата  $x$  точки Q витка №2;  $p_3$  – координата  $y$  точки Q витка №2;  $p_4$  – расстояние между витком №3 и заготовкой;  $p_5$  – расстояние между витком №1 и заготовкой;  $p_6$  – расстояние от верхней части выступа детали до витка №3. Вектор режимных параметров  $\tilde{P}^{(i)}$  включает параметр процесса  $\tilde{p}_1$ , наиболее существенно влияющий на управление режимом нагрева – силу тока индуктора  $I$ .

Задача совместной оптимизации для  $N_{\Sigma}=7$  формулируется с учетом ограничений вида (1) на параметры  $P_{\Sigma opt}^{(7)} = (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, P_{\Sigma 3}^{opt}, P_{\Sigma 4}^{opt}, P_{\Sigma 5}^{opt}, P_{\Sigma 6}^{opt}, P_{\Sigma 7}^{opt})$  аналогично постановке задачи, представленной в общем виде в главе 3. Согласно альтернативному методу, при  $N_{\Sigma}=7$  число точек  $M$ , в которых достигаются предельные отклонения  $\varepsilon_{min}^{(7)}$  температуры от заданного значения  $T^*$ , определяется соотношением:  $M=N_{\Sigma}+1=8$ . Для реализации процедуры оптимизации конечное температурное распределение  $T(X, l_j, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(7)})$  вдоль пространственной границы ABCDEF закаливаемого слоя (рис. 6, б) предлагается рассматривать как развертку по одной условной пространственной координате  $l \in [0; L]$ , где  $L = |AB| + |BC| + |CD| + |DE| + |EF|$ . Тогда оптимальное распределение температуры  $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(7)})$  вдоль границы упрочняемого слоя ABCDEF в конце стадии нагрева должно иметь вид, представленный на рисунке 7.



а – общий вид стальной заготовки; б – оптимизируемые параметры индуктора  
Рисунок 6 – Осесимметричная двумерная модель системы «индуктор–заготовка»

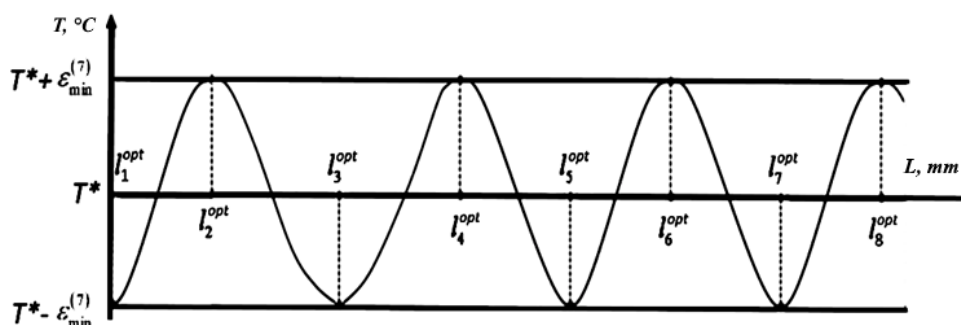


Рисунок 7 – Форма оптимального конечного распределения температуры в задаче совместной оптимизации для  $\varepsilon_{min}^{(7)}$

Система уравнений для решения сформулированной задачи совместной оптимизации при оптимальном конечном температурном распределении  $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(7)})$ , представленном на рис. 7, принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(X, \tau^0, l_j^{opt}, P_{\Sigma opt}^{(7)}) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_{\min}^{(7)} \quad j = 1, 8; \psi = \pm 1; \\ \frac{\partial T(X, \tau^0, l_m^{opt}, P_{\Sigma opt}^{(7)}) - T^*}{\partial l} = 0; \quad m = 2, 8, \\ P_{\Sigma opt}^{(7)} = (p_{\Sigma 1}^{opt}, p_{\Sigma 2}^{opt}, p_{\Sigma 3}^{opt}, p_{\Sigma 4}^{opt}, p_{\Sigma 5}^{opt}, p_{\Sigma 6}^{opt}, p_{\Sigma 7}^{opt}) \\ 0 = l_1^{opt} < l_2^{opt} < l_3^{opt} < l_4^{opt} < l_5^{opt} < l_6^{opt} < l_7^{opt} < l_8^{opt} \leq L; \end{array} \right. \quad (10)$$

где  $l_1^{opt} = 0$  соответствует точке А на верхнем торце заготовки (рис. 6, б),  $l_2^{opt}, l_3^{opt}, l_4^{opt}, l_5^{opt}, l_6^{opt}, l_7^{opt}, l_8^{opt}$  - координаты точек экстремумов,  $\varepsilon_{\min}^{(7)}$  - значение минимакса при  $N_{\Sigma} = 7$ .

Система (10) включает 15 уравнений, замкнутых относительно 15 неизвестных параметров: 7 оптимизируемых параметров, входящих в вектор  $P_{\Sigma opt}^{(7)}$ , 7 координат точек экстремума  $l_j^{opt}$ ,  $j = \overline{2, 8}$ , с максимальным отклонением температуры и минимакс  $\varepsilon_{\min}^{(7)}$ . Полученные в результате решения задачи значения оптимизируемых параметров представлены в таблице 3. Оптимальное температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя ABCDEF в конечный момент стадии нагрева показано на рисунке 8.

Для вычисления температурных отклонений  $T(X, \tau^0, l_j^{opt}, P_{\Sigma opt}^{(7)}) - T^*$  при решении системы уравнений производится обмен данными между ППП MATLAB и интегрированной в него моделью стадии нагрева, разработанной в ANSYS.

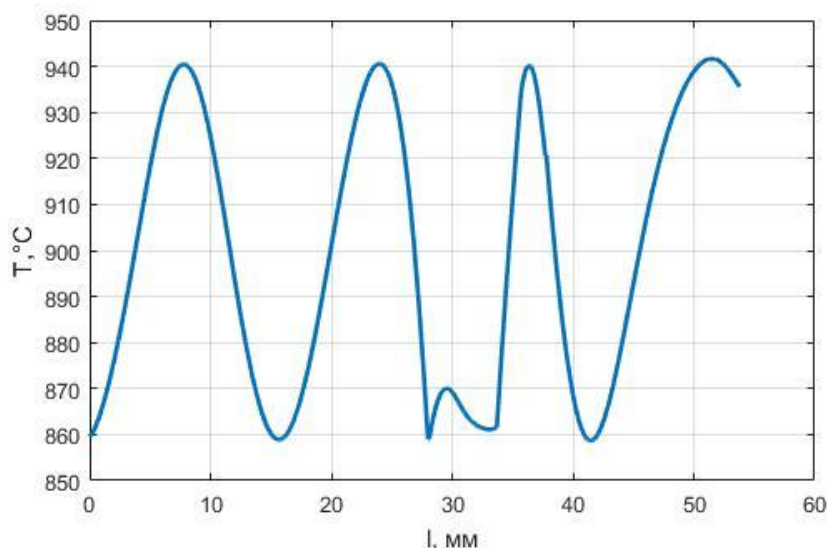
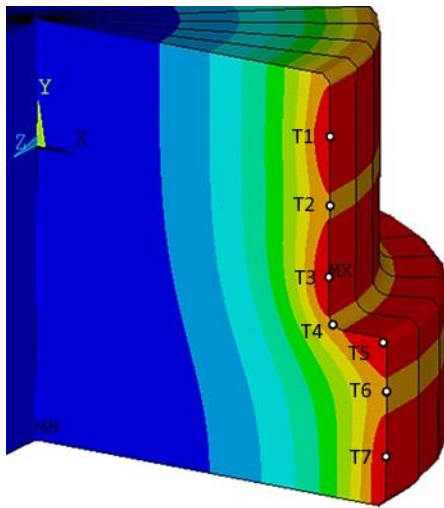


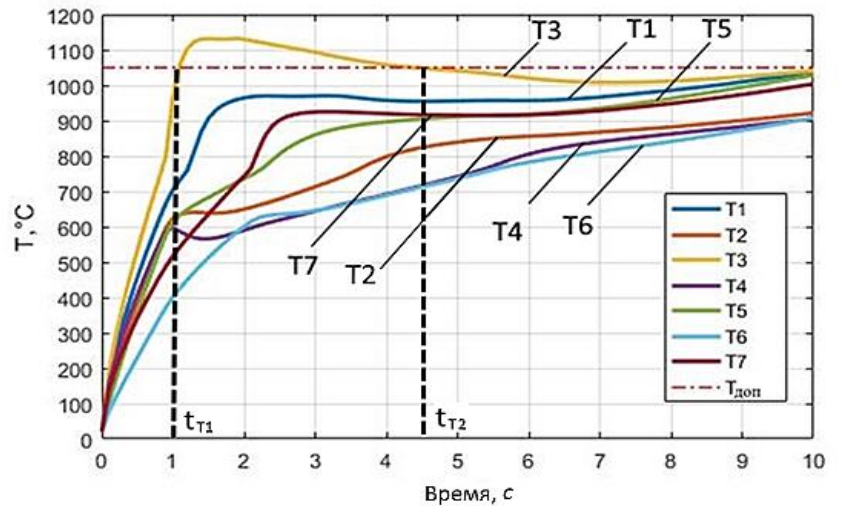
Рисунок 8 – Оптимальное температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя ABCDEF в конечный момент стадии нагрева

Динамика изменения температуры в оптимальном процессе нагрева в характерных точках на поверхности заготовки представлена на рис. 9, а-б.





а)



б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость изменения температуры от времени  
Рисунок 9 – Результаты решения задачи совместной оптимизации без учета ограничения (3) на максимальную допустимую температуру

Таблица 3 – Решение задачи совместной оптимизации без учета ограничения (3)

Параметр	$P_{\Sigma 1}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 2}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 3}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 4}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 5}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 6}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 7}^{opt}$ , А	Отклонение $\varepsilon$ , °С
Оптимальное значение	4.5	1.8	10.1	2.7	3	9.5	1584.9	40.8

На первом этапе решения задачи совместной оптимизации не были учтены ограничения (3) на максимально допустимую температуру во время нагрева. Анализ результатов решения задачи (рис. 9, б) показал, что максимальное значение температуры, превышающее предельно допустимое значение  $T_{дон} = 1050^\circ\text{C}$ , появляется в начале стадии нагрева в точке T3 и затем продолжает наблюдаться в пределах угловой зоны, что является нарушением технологического ограничения (3). В таком случае в стальных заготовках могут возникнуть повышенные термические напряжения, которые приводят к появлению деформации геометрии заготовки, микротрещинам, обезуглероживанию, повышенному окислению поверхности и ухудшению качества и равномерности микроструктуры.

Согласно методике, разработанной в главе 3, проблема локального перегрева поверхности заготовки может быть устранена путем введения нового управляющего воздействия  $I_{OY}(t)$  на временном интервале с  $t_{T1} = 1\text{c}$  до  $t_{T2} = 4.5\text{c}$  (рис. 9, б), на котором максимальная температура  $\max_{x,y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})})$  превышает допустимое значение  $T_{дон}$ . Поиск управляющего воздействия  $I_{OY}(t)$  на участке движения по ограничению представляет собой итерационный расчет значений силы тока на каждом временном шаге длительностью 0.1 с из условия выполнения равенства (4). Полученный в результате алгоритм управления током индуктора на всем протяжении процесса нагрева с учетом ограничения (3) имеет вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1584.9 \text{ A}, & t \in [0; 1]; \\ I_{ov}(t), & t \in (1; 4.5); \\ 1584.9 \text{ A}, & t \in [4.5; 10], \end{cases}$$

где  $I_{ov}(t)$  имеет вид ступенчато-постоянной функции (рис. 10).

Введение управления  $I_{ov}(t), t \in (1; 4.5)$  приводит к увеличению неравномерности температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева (кривая 1 на рис. 11), что снижает качество мартенситной микроструктуры в локальных зонах изделия или даже делает невозможным ее формирование в нижней части детали. Согласно разработанной в главе 3 методике (рис. 4), выполняется повторное решение задачи совместной параметрической оптимизации с учетом управления  $I_{ov}(t)$  на участке движения по ограничению (3). При этом оптимизируемый параметр  $P_{\Sigma 7}^{opt}, A$  представляет собой значение тока индуктора на интервале с момента окончания участка управления  $I_{ov}(t)$  (4.5 с) и до окончания стадии нагрева (10 с). Результаты повторного решения задачи совместной оптимизации представлены на рисунке 10 и в таблицах 4, 5. Сравнение температурных распределений до (рис. 11, кривая 1) и после (рис. 11, кривая 2) повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом найденного управления  $I_{ov}(t)$  позволяет сделать вывод об увеличении равномерности температурного распределения по границе закаливаемого слоя.

Таким образом, решение задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения (3) на максимальную допустимую температуру позволяет обеспечить нагрев заготовки максимально равномерно и без локальных перегревов. Согласно диаграмме аустенитного превращения для стали марки С45 (аналогичной С40), полученное максимальное абсолютное значение температурного отклонения  $40.6^\circ\text{C}$  находится в интервале температур выше линии АС3, определяющей границу формирования аустенитной микроструктуры.

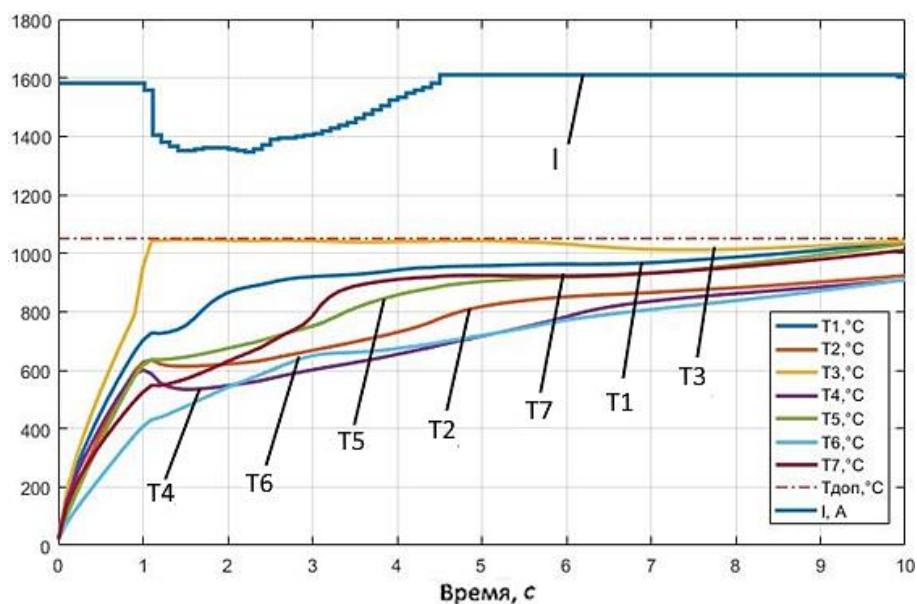


Рисунок 10 – Алгоритм управления и зависимости температуры от времени в узловых точках на поверхности детали в процессе нагрева

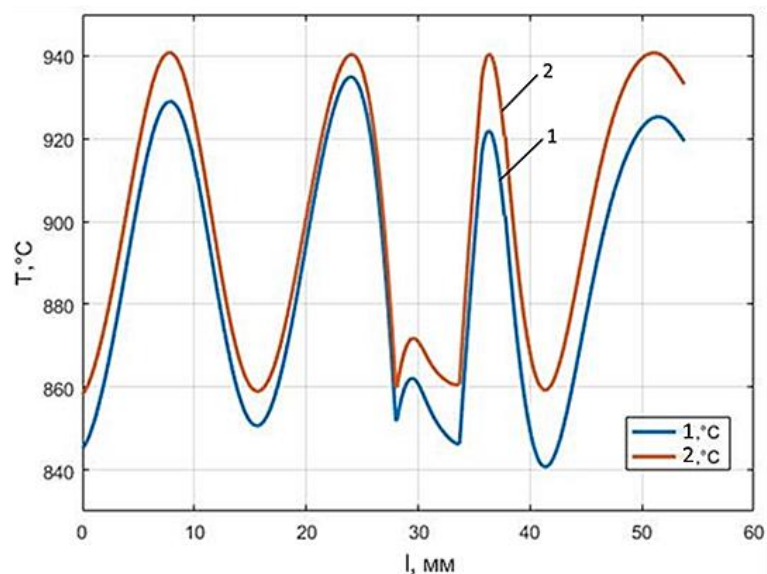


Рисунок 11 – Температурные распределения вдоль границы закаливаемого до (1) и после (2) повторного решения задачи совместной оптимизации с ограничением (3)

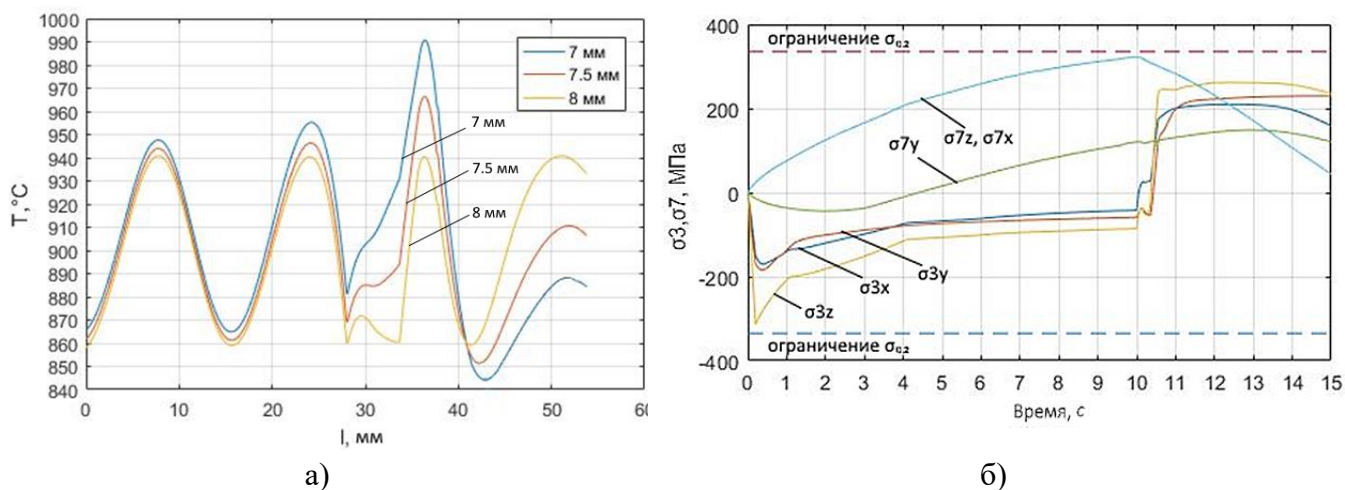
Таблица 4 – Оптимальные значения параметров без и с учетом ограничения (3) на максимальную допустимую температуру

Параметр	$P_{\Sigma 1}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 2}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 3}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 4}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 5}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 6}^{opt}$ , мм	$P_{\Sigma 7}^{opt}$ , А	Отклонение $\varepsilon$ , °С
Задача совместной оптимизации без учета ограничения (3)	4.5	1.8	10.1	2.7	3	9.5	1584.9	40.8
Задача совместной оптимизации с учетом ограничения (3)	4.5	1.7	8.8	2.6	3.1	9.4	1612.1	40.6

Таблица 5 – Координаты точек с максимальными отклонениями температур

Параметр	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	$l_3$ , мм	$l_4$ , мм	$l_5$ , мм	$l_6$ , мм	$l_7$ , мм
Задача совместной оптимизации с учетом ограничения (3)	7.9	15.9	24.4	28.4	36.9	42	51.8

На рисунке 12, а представлены температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя для номенклатуры деталей с шириной выступа от 7 мм до 8 мм. Результаты моделирования тепловых полей показали, что даже при изменении геометрии заготовки значения температуры в конце стадии нагрева вдоль границы закаливаемого слоя не опускаются ниже начала формирования аустенитной микроструктуры. На рисунке 12, б представлены осевые компоненты максимальных термических напряжений, достигаемых в точках  $\sigma_3$  и  $\sigma_7$  заготовки с выступом 8 мм. Анализ результатов моделирования оптимального процесса нагрева с учетом фазового ограничения (3) и процесса охлаждения показал отсутствие нарушения ограничений (5) по пределу текучести. Таким образом, предложенная в работе конструкция витков индуктора и найденный алгоритм управления током индуктора на стадии нагрева обеспечивают температурное распределение в поверхностном слое заготовки с угловой зоной, которое позволяет сформировать микроструктуру упрочняемого металла, отвечающую всем технологическим требованиям.



а – изменение температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя в зависимости от величины выступа; б – осевые компоненты термических напряжений детали с выступом 8 мм для стадии нагрева и охлаждения

Рисунок 12 – Результаты решения задачи совместной оптимизации с учетом фазового ограничения на максимальную допустимую температуру

Предложен вариант программной и технической реализации алгоритма управления с учетом ограничения на максимально допустимую температуру закаливаемого слоя детали.

**В заключении** диссертации формулируются основные результаты работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В программном пакете ANSYS Mechanical APDL разработана нелинейная двумерная осесимметричная модель процессов индукционного нагрева и охлаждения при поверхностной закалке стальных заготовок с угловой зоной для анализа и оптимизации взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей и полей термических напряжений.

2. Разработана методика совместного решения задач оптимального проектирования и управления индукционной установкой, обеспечивающей максимально равномерное распределение температурного поля в поверхностном слое упрочняемой заготовки сложной формы по окончании стадии нагрева под поверхностную закалку при отсутствии локальных перегревов и превышений термических напряжений.

3. Сформулирована задача поиска вектора параметров повышенной размерности, представляющего совокупность векторов конструктивных и режимных параметров. На основе альтернативного метода разработана методика и вычислительная технология решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки, которая распространяет альтернативные свойства оптимальных решений на температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя сложной геометрической формы, рассматриваемой как пространственная развертка по одной условной координате.

4. Разработан алгоритм численного решения нелинейных задач управления током индуктора на временных интервалах движения по фазовым ограничениям на максимально допустимые температуры и термонапряжения, обеспечивающий отсутствие ло-

кальных перегревов и превышение пределов термонапряжений по всему объему закаливаемого слоя заготовки сложной формы.

5. Разработанные методики и алгоритмы апробированы на примере численного решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции витков и алгоритма управления током индуктора для получения максимально равномерных температурных распределений в поверхностном слое стальной заготовки с угловой зоной по окончании стадии индукционного нагрева под закалку с учетом технологических ограничений на локальные перегревы и превышение пределов термонапряжений.

6. Разработана автоматизированная численная процедура для поиска значений оптимизируемых конструктивных и режимных параметров индуктора, реализованная путем совместного использования ППП ANSYS Mechanical APDL и MATLAB.

7. Последовательное решение задач поиска алгоритма управления на особом участке и совместной оптимизации позволило определить значения конструктивных и режимных параметров индуктора, при которых обеспечивается требуемая равномерность температурного поля вдоль границы закаливаемого слоя заготовки в конце стадии нагрева при отсутствии недопустимых перегревов на всем протяжении процесса.

8. Решение поставленных в диссертационном исследовании задач на основе разработанных методик позволило повысить равномерность температурного распределения и обеспечить значительное снижение максимального температурного отклонения от заданной температуры вдоль границы закаливаемого слоя с  $\pm 200^\circ\text{C}$  до  $\pm 40.6^\circ\text{C}$  без перегревов поверхностных слоев в диапазоне температур, при которых формируется аустенитная микроструктура. При этом термические напряжения не превышают предел текучести в 335 МПа. Таким образом, можно считать, что полученный результат отвечает технологическим требованиям, а основная цель диссертационного исследования, заключающаяся в повышении качества поверхностной закалки деталей сложной геометрической формы путем обеспечения максимально равномерного нагрева упрочняемого слоя при отсутствии в нем локальных перегревов и превышения пределов допустимых термических напряжений, достигнута.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в научных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

1. Pleshivtseva Y., **Pavlushin A.**, Popov A. Optimal Design of Inductor Coils for Surface Hardening // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022. – pp. 680–685.

2. Pleshivtseva Y., Popov A., **Pavlushin A.** New Approach to Optimization of Surface Induction Hardening Process // 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2022. – pp. 525–530.

3. Pleshivtseva Y., Popov A., **Pavlushin A.** Software Solution for Optimal Design of Inductor for Surface Hardening // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Math-

emational Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2021. – pp. 646–649.

4. Pleshivtseva Y. et al. Cyber-Physical Complex for the Optimal Design of Installation for Surface Hardening // Cyber-Physical Systems Engineering and Control. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – pp. 137–147.

#### **Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

5. **Павлушин А.В.** Проблемно-ориентированная модель технологического процесса поверхностной индукционной закалки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2022. – Т. 30. – №2. – С. 21–34.

6. **Павлушин А.В.** Оптимизация конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной установки для закалки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29. – №. 3. – С. 38–51.

7. **Павлушин А.В.** Совместная оптимизация конструктивных параметров индуктора и алгоритмов управления процессом нагрева под поверхностную закалку // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. №3. С. 17–28.

#### **Публикации в других изданиях:**

8. Киберфизический комплекс для оптимального проектирования процесса индукционной закалки / Ю.Э. Плешивцева, **А. В. Павлушин**, А.В. Попов, А.Л. Евелев // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 3. – С. 25–29. – DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2022\_3\_25. – EDN VBERAS.

9. **Павлушин А.В.** Двумерная численная нелинейная модель температурных и термонапряженных состояний стальной заготовки в процессе индукционного нагрева под закалку // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. – 2020. – С. 46–50.

10. **Павлушин А.В.** Оптимизация процесса индукционной закалки металлических заготовок с использованием численной ANSYS-модели // Тинчуриные чтения. – 2019. – С. 21–30.

11. **Павлушин А.В.** Численное моделирование температурных и термонапряженных состояний стальной заготовки в процессе индукционного нагрева под закалку // Научные междисциплинарные исследования. – 2020. – №. 5. – С. 23–31.

12. **Павлушин А.В.**, Плешивцева Ю.Э. Численное моделирование и оптимизация процесса индукционной закалки металлических заготовок с использованием программного пакета ANSYS // Наука. Технологии. Инновации. – 2018. – С. 58–62.

13. **Павлушин А.В.** Оптимизация индукционной закалки металлических заготовок сложной формы // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. —Екатеринбург, 2017. – 2017. – С. 307–310.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04,  
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
(протокол № 5 от «10» октября 2023 г.)

Тираж 100 экз. Заказ №\_\_\_\_\_.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Отпечатано в типографии.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной печати,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244