

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Плешивцева Юлия Эдгаровна

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Глава 1. Проблема поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы | 15 |
| 1.1 Процесс поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы | 15 |
| 1.2 Современные методы оптимизации электротехнологических систем с распределенными параметрами..... | 30 |
| 1.3 Содержательная постановка задачи диссертационного исследования и степень разработанности темы | 35 |
| 1.4 Выводы по первой главе..... | 40 |
| Глава 2. Численное моделирование процесса индукционной закалки | 42 |
| 2.1 Современные программные средства моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей и термонапряженных состояний | 42 |
| 2.2 Численное моделирование процессов нагрева и охлаждения в ППП ANSYS Mechanical APDL..... | 44 |
| 2.2.1 Алгоритм моделирования | 51 |
| 2.2.2 Результаты решения электромагнитной задачи..... | 64 |
| 2.2.3 Результаты решения тепловой задачи | 67 |
| 2.2.4 Результаты решения упругопластической задачи | 72 |
| 2.2.5 Результаты моделирования процесса охлаждения | 75 |
| 2.3 Выводы по второй главе..... | 80 |
| Глава 3. Постановка и методика решения задач оптимизации на основе альтернативного метода | 82 |
| 3.1 Постановка и методика решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора с учетом технологических ограничений..... | 82 |
| 3.2 Решение задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления на основе альтернативного метода | 87 |
| 3.3 Задача поиска управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям..... | 91 |
| 3.4 Выводы по третьей главе | 97 |

| | |
|--|-----|
| Глава 4. Построение численных оптимизационных процедур в программном пакете MATLAB | 99 |
| 4.1 Общая схема численных процедур оптимизации..... | 99 |
| 4.2 Интеграция численной ANSYS модели в оптимизационную процедуру .. | 102 |
| 4.3 Программная реализация блока оптимизации и управления | 105 |
| 4.4 Выводы по четвертой главе | 109 |
| Глава 5. Численное решение задач оптимизации процесса поверхностной индукционной закалки метода | 110 |
| 5.1 Решение задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений | 110 |
| 5.2 Решение задачи управления на интервалах движения по ограничениям . | 120 |
| 5.3 Решение задачи совместной параметрической оптимизации с учетом технологических ограничений..... | 124 |
| 5.4 Программная и техническая реализация алгоритма управления процессом поверхностного индукционного нагрева под закалку..... | 132 |
| 5.5 Выводы по пятой главе..... | 140 |
| Заключение | 142 |
| Список литературы | 144 |
| Приложение А. Справка об использовании результатов кандидатской диссертации.... | 155 |
| Приложение Б. Справка об использовании результатов кандидатской диссертации | 156 |
| Приложение В. Акт об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ | 157 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современные технологии термической обработки, к которым относится поверхностная индукционная закалка, широко используются на предприятиях различных отраслей промышленности. Применение технологии поверхностной индукционной закаливания связано с необходимостью получения требуемых свойств металла путем изменения его микроструктуры. Одной из ключевых задач в машиностроительном производстве является повышение надежности и увеличение срока службы ответственных и востребованных деталей, к которым относятся стальные втулки, специальные подпятники, валы, шестерни и другие металлические полуфабрикаты сложной геометрической формы. Изделия широкой номенклатуры проходят поверхностную закалку, основная цель которой – обеспечение достаточной твердости поверхностного слоя детали в сочетании с необходимой упругостью ее сердцевины.

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 поверхностной закаливания в индукторе по сравнению с другими конкурентоспособными способами термической обработки можно отнести: скоростной нагрев детали бесконтактным способом; отсутствие окисления и обезуглероживания поверхностного слоя в процессе нагрева; нагрев локальной зоны заготовки; возможность гибкого управления процессами нагрева и охлаждения; экологическая безопасность и энергоэффективность.

Высокое качество поверхностной закаливания достигается за счет формирования равномерной микроструктуры в поверхностном слое в конце стадии нагрева, зависящей в основном от равномерности температурного распределения при отсутствии локальных перегревов и превышения допустимых термонапряжений по всему объему заготовки. Трудности решения этой задачи многократно возрастают при усложнении геометрической формы заготовок, существенно увеличивающей неравномерность распределения внутренних электромагнитных источников тепла и, как следствие, температурных полей и полей термических напряжений. Особенно сложно обеспечить

требуемую равномерность температурного распределения в угловых и труднодоступных зонах, в которых недопустимая неравномерность температурных полей в конце стадии нагрева становится основным фактором, способным вызвать неоднородность мартенситной структуры упрочняемых деталей после закалки. Исследования показывают, проблема формирования равномерных температурных распределений не может быть решена при использовании типовых форм витков индуктора и режимов работы установки, сопровождающихся принципиально недопустимыми перегревами и недогревами локальных зон заготовок. Превышение термических напряжений на стадии охлаждения также часто приводят к растрескиванию и выбраковке изделий. Решение описанных нетривиальных проблем позволило бы 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.

Растущие технологические требования к качеству продукции металлургической и машиностроительной отраслей промышленности и общая тенденция к сокращению производственных издержек обуславливают необходимость совершенствования и модернизации производственных процессов. В этой связи особую важность приобретает задача оптимизации конструктивных параметров индукционных нагревательных систем для закалки и технологических режимов их работы.

Степень разработанности темы исследования

Широкий круг исследований зарубежных и отечественных авторов посвящен решению задач оптимального проектирования и управления системами с распределенными параметрами (СРП). Основы теории оптимизации и методов управления системами с распределенными параметрами, 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. Зиминой, М.Ю. Лившица, А.И. Данилушкина, А.С. Васильева и др. Большой вклад в решение проблемы оптимального проектирования индукторов по различным критериям оптимизации внесли исследования А. Алиферова, П. Ди Барбы, М. Форцана, А.Н. Никанорова, Б.

Наке, Д. Запаты, Т. Мэйнарда, С.А. Галунина, Э. Бааке, Т. Леука, С. Наджи, Л. Якубовичевой, А. Гашпареца, Г.Н. Рогачева и др [1-11].

Общая теория термоупругих явлений, сформулированная Н.А. Умовым, была в дальнейшем усовершенствована благодаря работам Дж. Гудьера, Г. Паркуса, Г.И. Бабата, С.П. Тимошенко, Н.Ю. Тайца, И.А. Биргера, И.А. Одингга, М.Н. Родигина, Б. Боли, Б.Ф. и других отечественных и зарубежных ученых. Проблемам моделирования процессов индукционного нагрева металла с анализом возникающих упругих 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, Коршикова С.Е. и др. [12-19].

В диссертационной работе Попова А.В. разработаны методики и алгоритмы решения задачи оптимального проектирования индуктора для закалки цилиндрических заготовок с учетом ограничений на максимально допустимую температуру. Однако, в работе не рассматриваются принципиальные проблемы, связанные с поверхностной индукционной закалкой заготовок сложной формы, и не исследуются термические напряжения, рассмотрение которых обязательно при закалке деталей сложной формы из-за критически возрастающей неравномерности распределения внутренних электромагнитных источников тепла по объему заготовки. [20].

Перечисленные обстоятельства обуславливают 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.

Методология и 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 паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

п. №4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

п. №5. Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами.

п. №12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

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.

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

- выполнении проекта РФФИ «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.); 3rd 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; 4th 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 по теме 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 [21-24, 28, 32] опубликованных в соавторстве, автору принадлежат методики и алгоритмы решения задач и результаты численных расчетов. Работы [25-27, 29, 30, 31, 33] написаны единолично.

Объем и структура диссертации

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.

Краткое содержание работы

В первой главе представлен обзор современного состояния проблемы исследования, связанной с индукционным нагревом деталей сложной формы под поверхностную закалку. Описаны физические основы процесса поверхностной индукционной закалики изделий сложной геометрической формы, рассмотрена широкая номенклатура ответственных изделий, для которых проблемы, возникающие при использовании типовых конструкций и режимов работы индукторов, приобретают критически важное значение. Приведены основные конструкции индукторов и способы индукционной закалики, а также представлен обзор актуальных методов оптимизации

электротехнологических установок и систем как объектов с распределенными параметрами.

Выполнен обзор актуальных методов оптимизации электротехнологических установок, определены их особенности, преимущества и недостатки. Приводится обоснование применения альтернативного метода параметрической оптимизации и обзор исследований, посвященных решению задач оптимального проектирования и управления индукционными нагревательными установками.

На основе проведенного анализа степени разработанности темы в общем виде сформулирована содержательная постановка задачи совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева заготовок сложной геометрической формы под поверхностную закалку.

Во второй главе приведен анализ современных программных пакетов для численного моделирования, обоснован выбор ППП ANSYS Mechanical APDL как основного инструмента для конечно-элементного анализа мультифизических процессов в диссертационной работе. Разработан алгоритм построения осесимметричной двумерной модели исследуемого процесса на стадиях нагрева и охлаждения, описаны нелинейные теплофизические свойства материала заготовки. В ходе исследования проанализировано влияние типовой конструкции витков индуктора и режимов работы индукционного нагревателя на распределение температуры в поверхностном слое угловой зоны ступенчатой втулки из типовой углеродистой стали марки С40. Проведена верификация модели путем сравнения результатов моделирования стадии индукционного нагрева, полученных в ANSYS Mechanical APDL и в программном пакете Altair FLUX.

В третьей главе рассматривается постановка и общая методика решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева под поверхностную закалку стальных ответственных деталей сложной геометрической формы с учетом технологических ограничений на максимально допустимую температуру и максимально допустимые термонапряжения. Решение задачи совместного поиска оптимальных конструктивных параметров и алгоритмов управления ОРП в предложенной постановке позволяет выбрать такие проектные и режимные решения, которые способствуют достижению максимального эффекта по выбранному показателю качества или комплексному критерию эффективности.

Для решения задачи совместной оптимизации с учетом технологических ограничений разработана общая методика, включающая решение задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений, проверки условий соблюдения ограничений на максимальную допустимую температуру и термические напряжения, при нарушении которых осуществляется переход к задачам поиска алгоритмов управления на особых участках.

На базе альтернативного метода оптимизации СРП разработана методика и вычислительная технология решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки, в которой рассматривается суммарный вектор оптимизируемых параметров повышенной размерности, представляющий совокупность векторов конструктивных и режимных параметров. В предложенной методике 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.

В четвертой главе для решения сформулированных в третьей главе задач по предложенным методикам, в диссертации разработаны численные процедуры, для реализации которых необходима взаимосвязанная работа пакета прикладных программ MATLAB и программного пакета для численного моделирования ANSYS Mechanical APDL в рамках единого программного комплекса.

Описано построение численных процедур для совместного решения задач оптимального проектирования индуктора и управления режимами его работы. Предложена общая схема численной реализации оптимизационных процедур в программном комплексе в ППП MATLAB, который позволяет выполнять итерационный поиск решения задач оптимизации. Подробно описана интеграция двумерной нелинейной модели взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, а также полей термических напряжений, разработанной в пакете ANSYS Mechanical APDL, в численные процедуры.

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

ступенчатой втулки по окончании стадии индукционного нагрева под закалку с учетом технологических ограничений на максимальную допустимую температуру и термические напряжения.

Приведены результаты численного решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева под поверхностную закалку стальных ответственных деталей сложной формы без учета ограничений, полученные с помощью разработанной итерационной процедуры оптимизации. Выполнен анализ полученных решений задач совместной оптимизации алгоритмов управления и конструкции индуктора, который показывает, что получена максимально достижимая в заданных условиях равномерность температурного распределения в закаливаемом поверхностном слое изделия при отсутствии в нем локальных перегревов и превышения пределов допустимых термических напряжений. Это свидетельствует о повышении качества поверхностной закалки деталей сложной геометрической формы, что является основной целью диссертационного исследования. Предлагается вариант технической и программной реализации полученного алгоритма управления, осуществляемой на основе совместного использования программной среды CoDeSys и пакетов ANSYS Mechanical APDL и MATLAB.

1. ПРОБЛЕМА ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

В первой главе представлен обзор современного состояния проблемы исследования, связанной с индукционным нагревом деталей сложной формы под поверхностную закалку. Описаны физические основы процесса поверхностной индукционной закалки изделий сложной геометрической формы, рассмотрена широкая номенклатура ответственных изделий, для которых проблемы, возникающие при использовании типовых конструкций и режимов работы индукторов, приобретают критически важное значение. Приведены основные конструкции индукторов и способы индукционной закалки, а также представлен обзор актуальных методов оптимизации электротехнологических установок и систем как объектов с распределенными параметрами. Приводится обзор современных исследований, посвященных решению задач оптимального проектирования и управления индукционными нагревательными установками, и обоснование применения альтернативного метода параметрической оптимизации как теоретической основы решения оптимизационных задач в диссертации. На основе проведенного анализа степени разработанности темы в общем виде сформулирована содержательная постановка задачи совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева заготовок сложной геометрической формы под поверхностную закалку, которая является центральной в диссертационной работе.

1.1 Процесс поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы

Процессы термической обработки металлов в настоящее время широко распространены, хорошо изучены и являются неотъемлемой частью производственных цепочек металлургических заводов и предприятий. Развитие технологий термообработки обусловлено ростом спроса на более совершенные и доступные детали и комплектующие, обладающие повышенной надежностью, прочностью, пластичностью и износостойкостью, которые обеспечивают увеличивающиеся объемы производства и отвечают предъявляемым к ним требованиям. Необходимость снизить стоимость выпуска изделий, создать конкурентоспособные изделия и обеспечить рынок

достаточным объемом продукции вынуждает производителей совершенствовать технологии термической обработки за счет модернизации оборудования, внедрения эффективных алгоритмов управления, создания новых технологий или оптимизации существующих в зависимости от требований к конечной продукции. Для обеспечения требуемого объема производства критически важных компонентов в условиях увеличивающегося спроса рекомендуется применять методы термической обработки с использованием индукционных нагревательных установок. Такие установки на практике продемонстрировали высокую эффективность, оперативность и надежность в эксплуатации.

Детали широкой номенклатуры и разнообразного назначения подвергаются термической обработке, нагревая их либо в индукторе, либо применяя альтернативные способы, например, такие как нагрев в газовых печах или электронагревателях сопротивления. В большинстве случаев использование альтернативных вариантов приводит к увеличению времени процесса и подразумевает необходимость сквозного нагрева детали.

Процесс термической обработки при использовании индукционного способа нагрева представляет собой цепочку сложных взаимосвязанных стадий, связанных с физическими процессами различной природы: электромагнитными, тепловыми, микроструктурными превращениями и т.д. Высокая сложность анализа физических явлений связана с сугубо нелинейным характером свойств материалов и другими усложняющими факторами.

Поверхностная закалка деталей различной формы и размеров представляет собой наиболее популярное применение индукционной термообработки, которая включает в себя:

- стадию скоростного нагрева упрочняемой части или всей заготовки до температуры, при которой формируется аустенитная микроструктура (рис. 1.1) [34];
- выдержку (при необходимости) в течение заданного периода;
- стадию интенсивного охлаждения ниже температуры начала мартенситного превращения.

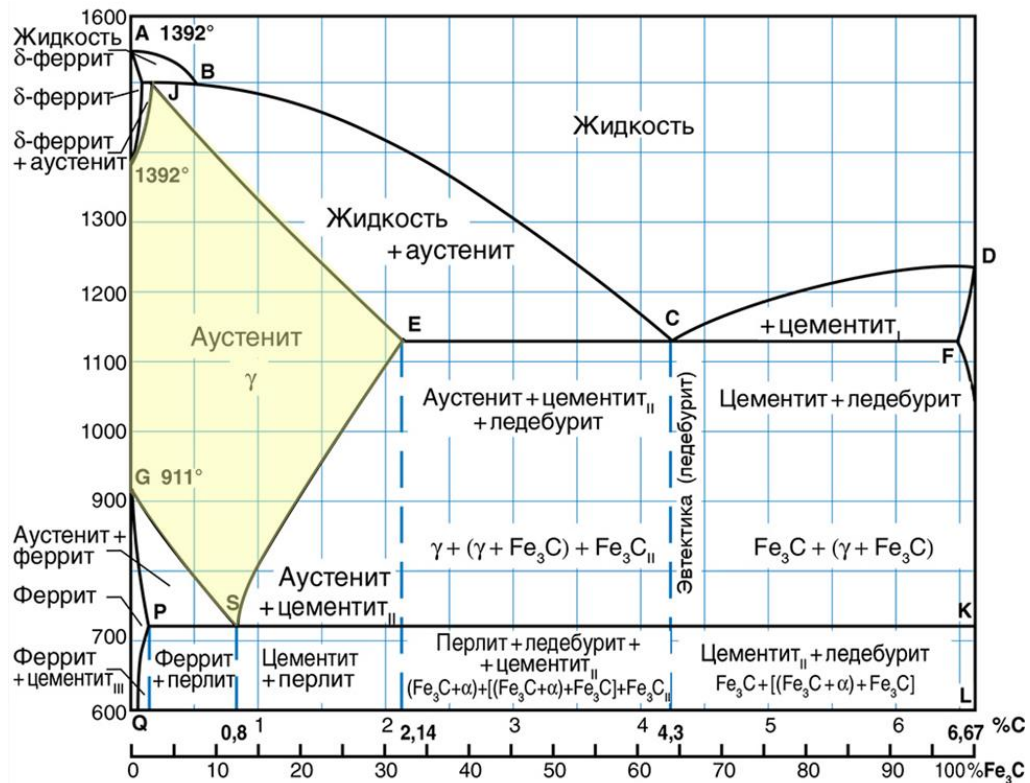


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния углеродистых сталей [34]

Для закалки в производственных условиях чаще всего используют модульные индукционные закалочные комплексы, основными компонентами которых являются: источник питания, станция согласования нагрузки (согласующий трансформатор между источником питания и витками), системы водяного охлаждения, электронные и механические системы управления и шинная сеть.

Существует большое разнообразие форм индукторов (рис. 1.2), применяемых для нагрева бесчисленного количества заготовок различной геометрии (рис. 1.3). Индукторы значительно различаются не только по форме, но и по размерам: от небольших и маломощных до высокомоощных промышленных [35]. Самый большой индуктор в мире с номинальной мощностью 6000 кВт/110 Гц предназначен для подогрева сляба из углеродистой стали максимальной шириной 3,2 м, и толщиной 0,22 м, а индуктор с номинальной мощностью 1,2 кВт/200 кГц, размер катушки которого не превышает 10 мм, используется для локальной термообработки отдельных участков мелких деталей. Индукционные катушки или катушки индуктивности обычно разрабатываются для конкретных изделий или для группы подобных заготовок [35,36].



Рисунок 1.2 – Разновидности катушек индукционных нагревательных установок [35]



Рисунок 1.3 – Многообразие стальных заготовок различной геометрической формы [35]

Самыми распространенными деталями, которые подвергаются термической обработке, являются шестерни, подшипники, валы, втулки и другие металлические детали различного назначения, испытывающие во время работы постоянные значительные осевые или радиальные нагрузки [27]. Такие изделия подвергаются термической обработке, в том числе упрочнению, с целью получения определенных свойств или комбинации свойств, таких как прочность и износостойкость, а также для формирования желаемого распределения и величины остаточных напряжений.

В некоторых случаях требуется закалка всего поперечного сечения заготовки, так называемая сквозная закалка. В других случаях требуется закалка только определенных выбранных областей, например, поверхностная закалка или закалка части заготовки. Наиболее широко распространенным требованием к закаливаемым изделиям является получение определенного сочетания твердости, износостойкости и прочности на поверхности или в граничащих с поверхностью зонах без изменения микроструктуры сердцевины. Такое требование часто предъявляют при упрочнении зубчатых колес или других зубчатых деталей. Однако, существуют условия, когда требуется увеличение твердости и прочности всего поперечного сечения детали, например, при производстве инструментов и оборудования, которые подвергаются равномерным нагрузкам по всему сечению. Применение индукционной закалки позволяет обеспечить самые разнообразные требования и их различное сочетание [35].

Для реализации индукционной закалки в настоящее время используется четыре основных способа [35,37].

1. Закалка в сканирующем индукторе (scanning hardening) обычно применяется для деталей простой геометрической формы, например, цилиндрической. Катушка и заготовка перемещаются друг относительно друга, при этом цилиндрическая заготовка вращается внутри индуктора для равномерного упрочнения по периметру [35].

2. Непрерывная закалка удлиненных заготовок (например, стержней, труб, проволоки, пластин и т.д.) производится при движении деталей в индукторе с постоянной скоростью. При этом отдельные зоны индуктора могут иметь различные мощности/частоты и конструктивное исполнение [35].

3. Закалка в одновитковом индукторе (single-shot hardening) происходит, когда ни деталь, ни индуктор не перемещаются в осевом направлении относительно друг друга. Вся площадь поверхности детали нагревается одновременно, вращаясь вокруг своей оси для более эффективного нагрева. Закалка в статическом одновитковом индукторе может быть более предпочтительной для непродолжительного нагрева поверхности до высоких температур. В таких процессах время нагрева для закалки одной заготовки может составлять всего 2 секунды, чаще всего стадия нагрева длится от 4 до 8 секунд. Такие индукторы работают при большей мощности по сравнению с индукторами, применяющимися для сканирующей закалки. Использование высокой

мощности и плотности токов в сочетании со сложной геометрией сокращает срок службы катушки индуктивности [35].

4. Закалка в статическом одновитковом или многовитковом индукторе (static hardening) аналогична закалке в одновитковом индукторе с вращающейся заготовкой, но в данном случае закаливаемая деталь обычно имеет сложную не типовую геометрию, препятствующую ее вращению. При статической поверхностной закалке индуктор и заготовка остаются неподвижными на всем протяжении процесса. Статическую закалку применяют, когда размер или геометрия металлической заготовки не позволяют использовать альтернативные методы закалки. Для статического упрочнения самых разных деталей с указанными особенностями требуется специальная геометрия витков катушки индуктора, соответствующая форме закаливаемой детали. Такой способ закалки обычно используется, когда требуется локальная закалка на определенных участках детали, таких как кулачки распределительного вала, поворотные кулаки или рабочие поверхности инструментов, и это лишь некоторые из областей ее применения. Эта технология значительно уменьшает искажение формы, предотвращая во многих случаях необходимость последующей операции устранения деформации обрабатываемой детали. Подобно закалке в одновитковом индукторе, при закалке в статическом индукторе нагрев может выполняться несколькими короткими импульсами (импульсный нагрев) с временной задержкой между ними для обеспечения передачи тепла в области, где тепловыделение может быть ограничено [35].

Разные производители используют конструкции как вертикальных, так и горизонтальных индукционных установок для закалки. В зависимости от технологических требований и геометрии детали оборудование для индукционной закалки может быть выполнено как относительно простое устройство с ручной загрузкой/разгрузкой, так и как более сложное, включающее полностью автоматизированное высокопроизводительное оборудование [35, 38, 39].

Основной проблемой поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы является невозможность достижения требуемых по технологии температур в труднодоступных зонах и недопустимая неравномерность распределения температуры поверхностного слоя в целом. В следствие недогрева до требуемых температур, в частности в угловых зонах, может не сформироваться аустенитная микроструктура, а из-за высокой неравномерности могут образоваться критические

термонапряжения. Сложности решения этой проблемы многократно возрастают, когда труднодоступные зоны детали не нагреваются до требуемых температур, а зоны выступов деталей сильно перегреваются. В таких случаях сугубо неравномерное распределение внутренних электромагнитных источников тепла в типовых индукторах, оказывает существенное влияние и приводит к недопустимым распределениям температурных полей и полей термических напряжений. Особенно сложно обеспечить требуемую равномерность температурного распределения в угловых зонах, в которых резкие температурные перепады в конце стадии нагрева становятся основным фактором, способным вызвать неоднородность мартенситной структуры упрочняемых деталей после закалки. Исследования показывают, что эта проблема не может быть решена при использовании типовых форм витков индуктора и режимов работы установки, сопровождающихся принципиально недопустимыми перегревами и недогревами локальных зон заготовок. Превышение термических напряжений на стадии охлаждения также часто приводят к растрескиванию и выбраковке изделий.

Решением указанных проблем может стать сквозной нагрев детали под закалку в печах с внешним теплообменом, но такой подход далеко не всегда позволяет получить сочетание механических свойств, которое соответствует требованиям длительной эксплуатации. Кроме того, при длительной термообработке с внешним источником тепла могут возникнуть значительные искажения размеров и формы детали. Напротив, индукционный способ нагрева позволяет быстро создать необходимое температурное распределение строго в определенных зонах детали, что, в свою очередь, способствует выпуску большого числа изделий с повторяемым качеством обработки. Индукционная термообработка часто более энергоэффективна и безвредна для окружающей среды, чем другие методы термообработки. Кроме того, индукционное оборудование практически не требует длительных пусков и остановов, использует минимальные производственные площади и приводит к незначительной деформации заготовки [35].

В большинстве случаев индукционная поверхностная закалка характеризуется высокой точностью сохранения размеров упрочняемых деталей. Возможность обеспечения незначительного или допустимого уровня деформации детали после термической обработки в индукторе обусловлена тем фактом, что процесс нагрева происходит с высокой скоростью, а выделение тепла концентрируется в упрочняемом слое. Температура в центре детали остается относительно низкой, что оказывает

стабилизирующее воздействие на форму детали. Например, при нагреве распределительного вала (для 1,5- и 2-х литровых дизельных или бензиновых двигателей) в индукторе от компании CamPro™ достигается почти незаметная деформация примерно 3-5 мкм, что позволяет исключить трудоемкую и дорогостоящую последующую операцию правки распределительного вала [35, 38, 40].

В зависимости от специфики процесса время нагрева для завершения аустенизации поверхностного слоя одной детали часто составляет от 1 до 10 секунд. В то же время, существуют технологические процессы, в которых длительность стадии нагрева может составлять доли секунды.

Как правило осесимметричные заготовки цилиндрического типа закаливают при помощи сканирующего индуктора или одновиткового индуктора. При этом в процессе нагрева катушка и заготовка вращаются вокруг своей оси, перемещаясь относительно друг друга. Однако существует класс деталей со специфическими особенностями геометрической формы, которые в виду сложной геометрии не нагревают при помощи индукторов с вращением.

К особенностям таких деталей можно отнести:

- прямоугольный выступ с шириной плеча от 7 до 10 мм;
- высота заготовки не более 75 мм;
- толщина поверхностного закаливаемого слоя 1-3мм;
- радиус верхней цилиндрической части заготовки не менее 40 мм.

Для нагрева заготовок, с указанными особенностями геометрической формы, необходимо применять статическую закалку в одновитковом или многовитковом индукторе без вращения заготовок.

Применение сканирующей закалки к валам с выступами определенного размера, многочисленными и большими изменениями диаметра и другими геометрическими неровностями может привести к формированию сильно неоднородного упрочняемого слоя. В таких случаях витки сканирующего индуктора должны иметь несколько больший внутренний диаметр, чтобы обеспечить достаточный зазор для безопасной обработки детали. Однако изменения диаметра вала в значительной степени приводят к соответствующим существенным изменениям расстояния между заготовкой и катушкой на разных участках вала. Кроме того, острые углы имеют явную склонность к перегреву из-за образования вихревых токов, особенно при использовании средних и высоких

частот. Для нагрева зон сложной геометрической формы необходимо выдерживать минимально возможное расстояние между индуктором и заготовкой, что в сканирующих индукторах не применяется. Электромагнитные концевые и краевые эффекты также могут вызывать сильный перегрев выступа, в то время как область меньшего диаметра вблизи выступа (включая изгибы и скругления) может испытывать заметный дефицит тепла. Эти факторы могут привести к тому, что профиль твердости, как по глубине, так и по величине может стать существенно неравномерным, что делает неприемлемым применение такого способа закалки и приводит к необходимости использования статического индуктора.

Детали сложной формы с указанными особенностями широко распространены и используются машиностроительном производстве. В качестве примера на рисунке 1.4 представлены компоненты узла автомобильного переднего привода сложной геометрической формы, которые представляют собой шарнир равных угловых скоростей автомобильного переднего привода, который был разрезан и вытравлен для демонстрации рисунка закаленного слоя [35, 38]. На рисунке 1.4 показано, что толщина закаливаемого слоя по всему сечению узла не одинаковая, что говорит о неравномерном температурном распределении в процессе нагрева, а в области внутреннего угла с самым большим выступом, выделенным отдельно, толщина закаливаемого оказывается значительно меньшей по сравнению с прямыми участками. Для таких деталей необходимо выполнять поверхностную закалку для обеспечения различных требований, предъявляемых к прочности, твердости и износу. Одновременно необходимо обеспечить требуемую прочность на кручение узкой удлиненной цилиндрической части и твердую внешнюю поверхность, в то время как мягкая центральная часть должна быть прочной и в то же время пластичной, чтобы выдерживать механические удары и ударные нагрузки. Внутренняя и внешняя поверхности должны обладать определенным сочетанием твердости для достаточной износостойкости, так как втулка скольжения, шариковые подшипники ходят по дорожкам качения или дорожкам скольжения. Резьба на этом компоненте удерживает колесо на месте. Зубья также закалены, а затем отпущены, чтобы обеспечить необходимое сочетание прочности и твердости. Закалка подобных деталей почти всегда производится с помощью индукторов с витками особой формы (рис. 1.1).



Рисунок 1.4 – Компоненты автомобильного переднего привода [35]

На рис. 1.5 показано поперечное сечение поверхностно-упрочненной стержневой детали со сложной геометрией, содержащей многочисленные радиальные и продольные отверстия, выступы, изменения диаметра, шпоночные канавки и другие геометрические неровности, которые подчеркивают сложность термической обработки таких деталей.

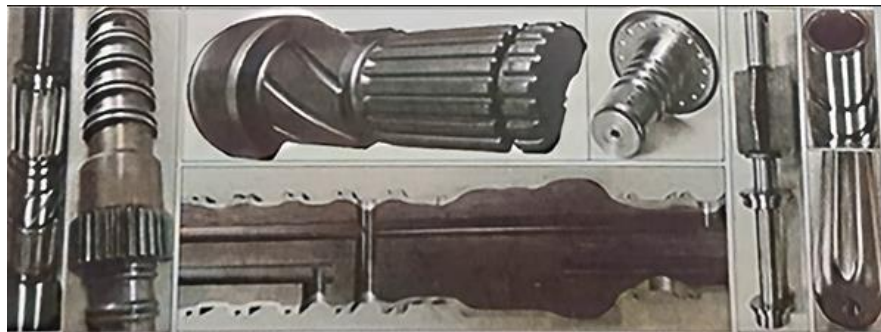


Рисунок 1.5 – Различные детали сложной геометрической формы [35]



Рисунок 1.6 – Примеры деталей сложной геометрической формы с отверстиями, острыми углами и другими неровностями [35]

Подшипники, шестерни, коромысла, валы насосов, шарико-винтовые пары, маленькие штифты и пластины скольжения являются примерами деталей, которые требуют плоского закаленного покрытия в первую очередь для повышения износостойкости (рис. 1.6). Глубина упрочненного слоя для подобных деталей обычно находится в пределах 0,25-1,25 мм, что обычно достаточно, для того чтобы деталь

выдерживала относительно небольшие нагрузки. Аустенитизация для достижения малой глубины закаливания требует высоких частот тока, короткого времени процесса и высокой мощности; обычно используются частоты в диапазоне от 600 кГц до 70 кГц [35]. В некоторых случаях для поверхностного упрочнения твердых деталей с малой глубиной закаливаемого слоя и умеренными требуемыми уровнями твердости можно использовать методы самоупрочнения (также называемые массовым упрочнением). Поскольку в таких случаях нагретый поверхностный слой очень тонок и его масса ничтожно мала по сравнению с гораздо большей массой холодной приповерхностной области, за счет отвода тепла к холодной сердцевине возможно достаточно быстрое охлаждение поверхности. Скорость охлаждения должна быть достаточно высокой для образования мартенситной структуры. Масса холодной части детали действует как большой поглотитель тепла. Таким образом, самозакалка в некоторых случаях может сделать ненужным использование закалки с помощью водяного охлаждения, за исключением случая применения охлаждения, необходимого для безопасной работы с деталью. Компоненты, требующие как износостойкости, так и умеренной нагрузки, такие как рулевые рейки, распределительные валы и коленчатые валы, обычно подвергаются индукционной закалке на глубину от 1 до 4 мм. Поскольку нагрузочные напряжения спадают с поверхности экспоненциально, большая глубина закалки значительно упрочняет деталь по сравнению с мелкими закаленными вставками. Частоты тока индуктора, необходимые для достижения этой глубины, обычно находятся в диапазоне от 10 кГц до 200 кГц. Детали, которые должны выдерживать большую нагрузку, требуют значительно большей глубины мартенситного слоя. К ним относятся полуоси, оси колес, специальные втулки, большие сверхпрочные звездочки и распределительные валы.

Необходимость в качественной, воспроизводимой в массовом производстве, технологии поверхностной закалки деталей создает спрос на разработку индуктора со специальной конструкцией витков, которая позволит нагреть деталь максимально равномерно по всему объему упрочняемого слоя.

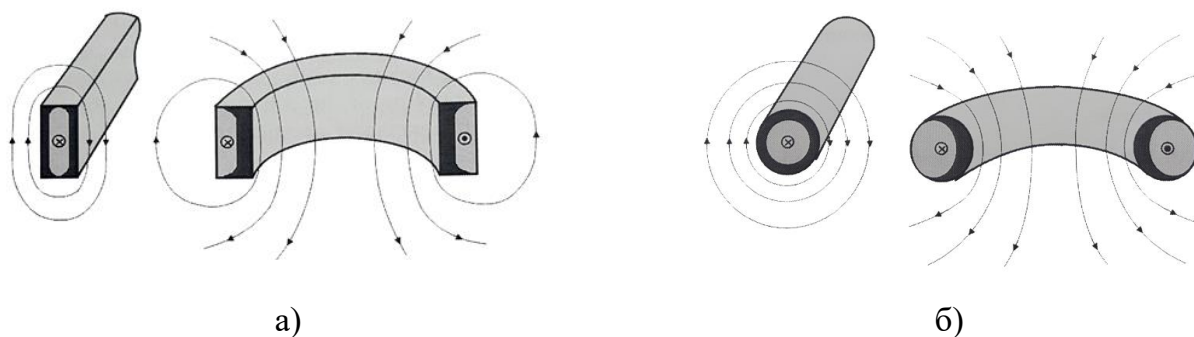
Постановка и решение задачи оптимального проектирования индуктора и поиска оптимального режима его работы способствуют созданию высокоэффективных нагревательных установок, которые позволят получать изделия с требуемым сочетанием качеств. При проектировании витков индуктора для осесимметричных заготовок

учитывается ряд факторов, влияющих на конечное температурное поле заготовки, форма которого при поверхностной индукционной закалке определяется:

- частотой тока (в зависимости от технологии);
- удельной мощностью;
- выдержкой (при необходимости);
- сочетанием геометрии заготовки и витков индуктора.

Другими не менее существенными факторами являются:

- электромагнитный эффект, возникающий при кольцевой форме витков, когда распределение плотности тока и его интенсивность вдоль поверхности меняются по поперечному сечению. Наибольшая величина плотности тока наблюдается на поверхности внутренней части витка (рис. 1.7) [7, 8, 35, 41-43];
- скин-эффект, описывающий причины формирования вихревых токов вблизи поверхности; эффект близости, описывающий искажение распределения тока и электромагнитной мощности по их поперечному сечению из-за взаимодействия магнитных полей близлежащих проводников и краевые эффекты [35, 41].



а – прямоугольной формы; б – круглой формы

Рисунок 1.7 – Распределение плотности токов по поперечному сечению проводников [35,41]

Для заготовок, подлежащих термообработке в индукторе, площадь поперечного сечения и величина нагрузки, которую они должны выдерживать, определяют соответствующую глубину упрочняемого слоя. Глубина проникновения электромагнитного поля является ключевым фактором для реализации стадии нагрева. Практически считают, что индуцируемый в изделии ток сосредоточен в поверхностном слое толщиной [9, 35, 41]:

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \text{ м}, \quad (1.1)$$

где ρ — удельное электросопротивление проводника с током, $\Omega \cdot \text{м}$; μ — магнитная проницаемость материала заготовки; f — частота тока, Гц.

Вторичное магнитное поле, образуемое вихревыми токами внутри заготовки, ослабляет первичное магнитное поле. Из-за этого физического явления, которое называют поверхностным эффектом, плотность тока в заготовке имеет максимальное значение на ее поверхности и уменьшается по мере удаления от неё. Интенсивность уменьшения плотности тока определяется удельной электрической проводимостью σ и магнитной проницаемостью μ материала заготовки, а также частотой тока индуктора f . Таким образом, глубина проникновения тока, а значит, и толщина закаливаемого слоя уменьшаются с увеличением частоты тока. Распределение плотности тока количественно описывается глубиной проникновения δ электромагнитного поля (1.1), которая зависит от электромагнитных и теплофизических свойств материала (рис. 1.8) [41].

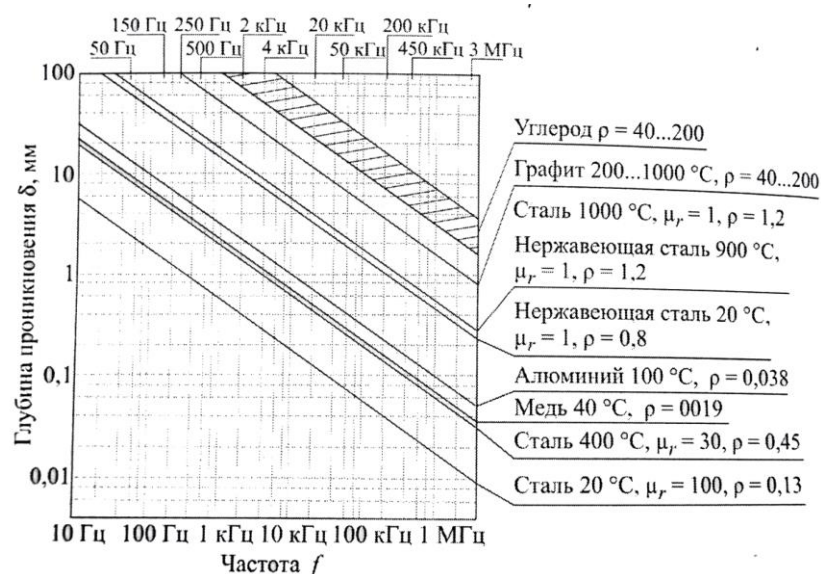


Рисунок 1.8 – Глубина проникновения электромагнитного поля в зависимости от частоты тока и материала [41]

Подобное описание глубины проникновения электромагнитного поля теоретически полностью справедливо только для заготовки с плоской неограниченной поверхностью, но с некоторой долей приближения может быть использовано и для цилиндрических заготовок, если отношение диаметра заготовки к глубине проникновения больше четырех ($d/\delta > 4$). В таких случаях внутри поверхностного слоя выделяется 86 % энергии

электромагнитной волны, и только 14 % – вне этого слоя. Поскольку глубина проникновения зависит от частоты, она может точно регулироваться рабочей частотой тока индуктора [41].

Электрический КПД $\eta_{эл}$ индуктора является наиболее важным фактором, который должен учитываться при проектировании новых форм витков и режимов работы установки, поскольку он определяет отношение мощности, выделяющейся в заготовке, к полной активной мощности, подведенной к индуктору. Отношение размера диаметра заготовки к глубине проникновения d/δ является вторым важным фактором с точки зрения мощности, выделяющейся в заготовке, и электрического КПД (рис. 1.9) системы «индуктор – нагрузка». Подведенная к индуктору полная активная мощность представляет собой сумму выделяющейся в заготовке мощности и электрических потерь в индукторе. Выражение для вычисления электрического КПД индуктора в зависимости от удельного электрического сопротивления материалов индуктора и заготовки (рис. 1.10), учитывающее зависимость сопротивления заготовки от отношения d/δ имеет вид [9,41]:

$$\eta_{эл} = \frac{P_i}{P_i + P_{Cu}} = \frac{1}{1 + \frac{D l}{d h} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\mu_r \rho f_{Cu}} \cdot \frac{1}{m}}}, \quad (1.2)$$

где P_i – полезная мощность, передаваемая в заготовку; P_{Cu} – потери в проводе индуктора; d – диаметр заготовки; D – внутренний диаметр индуктора; l – длина индуктора; h – высота цилиндрической заготовки; f_{Cu} – коэффициент заполнения индуктора медью; ρ_{Cu} – удельное сопротивление материала индуктора; ρ – удельное сопротивление материала заготовки; m – функция сопротивления [9,41].

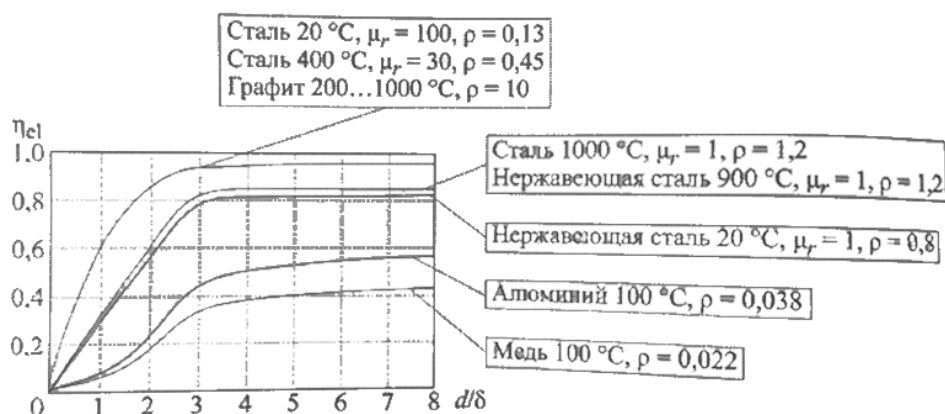


Рисунок 1.9 – Электрический КПД (1.2) индуктора как функция отношения диаметра заготовки к глубине проникновения тока [41]

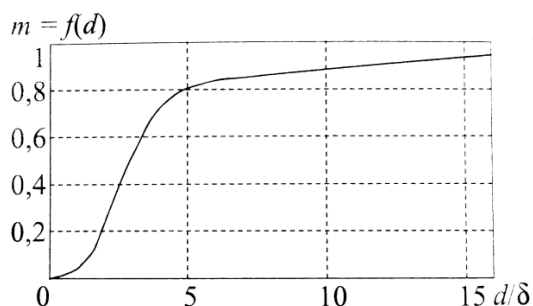


Рисунок 1.10 – Зависимость электрического сопротивления от соотношения d/δ [41]

При проектировании должны учитываться потери тепла конвекцией и излучением, которые являются главными тепловыми потерями с поверхности заготовки в окружающую среду. Конвекция играет важную роль при низкотемпературном нагреве. Тепловые потери с излучением оказываются существенны при высоких температурах. Время нагрева определяет суммарное значение тепловых потерь. Если время нагрева мало (например, при индукционной поверхностной закалке), то тепловые потери незначительны, в то время как для больших длительностей нагрева (нагрев под ковку) они составляют 5-10% от общих потерь [41].

Состояние поверхности заготовки до обработки является еще одним фактором, который может оказывать заметное влияние на конечный результат термической обработки и срок службы изделия в процессе эксплуатации. К основным возможным дефектам поверхности относятся пустоты, микротрещины, насечки, нежелательная концентрация дополнительных элементов, крупные включения и других поверхностные и приповерхностные неровности. При наличии указанных дефектов температурные градиенты и напряжения могут достигать критических значений и создавать новые микротрещины. Напротив, микроструктуры с гладкой поверхностью без пустот, микротрещин и насечек облегчают процесс термообработки и положительно влияют на формирование требуемых механических свойств.

Таким образом, для нагрева деталей с труднодоступными и угловыми зонами требуется создание специальной конструкции витков индуктора, а также определение оптимального режима его работы, параметры которого можно отыскать с помощью современных методов оптимизации. Все основные вышеперечисленные факторы необходимо учитывать в процессе поиска оптимальных проектных решений и технологических режимов работы индукционной нагревательной установки под поверхностную закалку деталей.

1.2 Современные методы оптимизации электротехнологических систем с распределенными параметрами

В самом общем случае формализованный подход к решению оптимизационных задач состоит из следующих этапов:

- оценка характеристик объекта оптимизации и требований, предъявляемых к нему;
- содержательная постановка задачи оптимизации;
- построение модели объекта оптимизации;
- математическая постановка задачи оптимизации;
- выбор математических методов, используемых для решения задачи.

Для решения задач оптимизации электротехнологических систем применяют известные подходы и методы оптимизации (рис. 1.11), каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки в приложении к различным классам задач [10].



Рисунок 1.11 – Основные методы оптимизации электротехнологических систем с распределенными параметрами [10]

Для обеспечения оптимальных режимов функционирования СРП могут быть использованы две группы методов, каждый из которых предназначен для решения конкретных задач и может быть применен в зависимости от целей оптимизации и требований к системе управления [10].

Первая группа включает методы, связанные с приближенным описанием ОРП известными способами путем перехода к модели объекта с сосредоточенными параметрами и последующим применением аппарата теории систем с сосредоточенными параметрами (ССП) без учета специфики пространственной

распределённости управляемых величин и управляющих воздействий (методы исходной дискретизации [44]) [10].

При очевидных достоинствах, определяемых возможностями использования методов исходной дискретизации, им присущи значительные недостатки, основным из которых является потеря обусловленных пространственной распределенностью функции состояния ОРП принципиальных физических свойств объектов, которыми не обладают сосредоточенные системы [1, 10, 11].

В результате, характеристики управляющих алгоритмов для приближенных моделей, могут не соответствовать свойствам реальных (ОРП), и метод исходной дискретизации может в ряде случаев давать неточные результаты [1, 10, 11]. Кроме того, при использовании данного метода часто возникают проблемы, связанные с высокой размерностью вектора состояния аппроксимирующей сосредоточенной системы: сложностью обеспечения устойчивости относительно потенциальных ошибок в промежуточных вычислениях, а также необходимостью доказательства сходимости конечномерных приближений и другими фундаментальными аспектами [10]. Из-за упомянутых существенных ограничений методы исходной дискретизации в дальнейшем не рассматриваются.

Другая группа методов основана на подходе, обеспечивающем сохранение всех качественных особенностей СРП, который заключается в решении задачи оптимального управления непосредственно для исходных моделей распределенных систем с использованием методов аппроксимации лишь на заключительном этапе с целью получения конкретных численных результатов по уже найденной стратегии управления (методы завершающей дискретизации) [44]. Значительным недостатком методов этой группы является существенное усложнение задачи, что требует разработки новых подходов к их решению, выходящих за рамки традиционных методов классической теории автоматического управления [10].

Группа методов завершающей дискретизации включает:

- методы, основанные на применении аналитических условий оптимальности в виде различных форм принципа максимума;
- численные методы оптимизации;
- метод моментов

и другие методы.

На практике часто применяют принципы максимума Понтрягина и его различные модификации в качестве метода определения алгоритмов оптимального программного управления. В задачах оптимального программного управления ОРП аналитические условия оптимальности записываются в виде различных форм принципа максимума, представляющих собой обобщения центрального результата теории оптимального управления ССП на бесконечномерные СРП [45, 46].

Ю. В. Егоров показал, что принцип максимума Понтрягина можно применить к модели ОРП в виде бесконечной системой обыкновенных дифференциальных уравнений [4, 5, 10, 11, 47, 48-50]. Этот подход во многих ситуациях позволяет установить структуру оптимальных программных алгоритмов, используя эффективные стандартные процедуры в рамках теории управления ССП, без необходимости применения новых специальных методов исследования [8, 10, 11, 51, 52].

Различные формы принципа максимума, применимые к моделям ОРП в виде уравнений в частных производных, предложены А.И. Егоровым, Ж.-Л. Лионсом, Т.К. Сиразетдиновым для решения широкого круга ЗОУ с различными критериями оптимальности и управляющими воздействиями [10, 53-55].

А.Г. Бутковский предложил новый принцип максимума для моделей ОРП в форме интегральных уравнений, что позволяет значительно упростить поиск программных оптимальных управлений, поскольку не требуются решения систем уравнений в частных производных, которое необходимо при описании ОРП с помощью дифференциальных операторов [10, 11, 49].

В большинстве случаев задачи оптимизации электротехнологических систем решают при помощи численных методов, которые разделяют на две группы для решения задач управления объектами с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Среди наиболее распространенных численных методов можно выделить алгоритмы градиентного поиска. Они осуществляются в соответствии с общими схемами градиентных методов минимизации функций, описанных для конечного числа переменных. Эти методы также используют специальные выражения для вычисления градиентов минимизируемых функционалов, что связывает приращение критериев оптимальности с вариациями управляющих воздействий [10, 28, 56, 57, 58].

Еще одним современным численным методом оптимизации является метод градиентного спуска, основы которого описаны в работе Б. Т. Поляка [59]. Модификации на его основе порождают большинство других численных методов оптимизации. Метод градиентного спуска активно используется в вычислительной математике, может быть использован для задач оптимизации в многомерных пространствах [60], например для численного решения задач оптимального управления [61-66]. Но особенно большой интерес к градиентным методам в последние годы связан с тем, что градиентные спуски и их стохастические вариации составляют основу почти всех современных алгоритмов машинного обучения, разрабатываемых в анализе данных [67]. Недостатком метода градиентного спуска является низкая скорость сходимости, что вызывает трудности при решении задачи с большой точностью.

Для решения задач оптимального управления и проектирования существуют эволюционные и генетические методы, к которым относятся алгоритмы (AGDEMO, ASDEMO, M-NSGA) и генетические (GA, NSGA-II) [20, 68-73]. В виду возможного нахождения локального минимума методы не являются гарантированно точными, но с их помощью можно ускорить решение задачи, путем сужения диапазона поиска значений [20].

Эффективным способом решения сложных краевых задач оптимального управления ОРП с заданным конечным состоянием объекта является применение метода моментов, предложенного применительно к ССП Н.Н. Красовским [74] и распространенного на задачи управления СРП А.Г. Бутковским [1, 10, 48].

Преимущественно методом моментов является алгоритм расчета оптимального управления в задачах с заданным конечным состоянием модели объекта управления. При $N \rightarrow \infty$ точное решение бесконечномерной проблемы моментов отсутствует, по этой причине выполняется ограничение, при котором справедливо неравенство $N < \infty$ интегральных соотношений для первых N мод управляемой величины. При небольшом значении параметра N конечномерное представление также может не иметь решений по причине неуправляемости ОРП относительно заданных начальных и конечных состояний, что является главным недостатком данного метода [8, 10, 20].

В диссертационной работе рассматриваются задачи оптимального программного управления, для решения которых применяются представленные выше методы. В зависимости от характера искомых управляющих воздействий задачи программного

оптимального управления распределенными объектами и условия оптимальности, используемые для их решения, приобретают различное смысловое содержание.

Если рассматривать оптимизацию динамических режимов работы ОРП с использованием изменяющихся со временем управлений с заранее определенным их пространственным распределением, то такие ЗОУ ОРП аналогичны по функциональному назначению задачам динамической оптимизации в ССП [10].

Задача робастного программного управления сводится к поиску оптимальных по выбранному критерию качества управляющих воздействий, которые переводят все возможные траектории процесса в заданное целевое множество. При этом ансамбль траекторий определяется всеми допустимыми реализациями неопределенных факторов объекта [75, 76]. В такой постановке ЗОУ ОРП может быть решена методами, аналогичными используемым применительно к СРП с полным объемом информации об управляемом процессе [8, 11, 52, 75].

Проблема оптимизации статических состояний ОРП во многих случаях представляет задачу его оптимального проектирования, т.е., по сути, требуется отыскать проектных решения в форме неизменных во времени пространственных управляющих воздействий в области, занимаемой объектом [77]. Типовые пространственно – одномерные модели ОРП описывают статическое состояние объекта обыкновенными дифференциальными уравнениями относительно управляемой величины, изменяющейся по пространственной координате [1, 10].

Задача поиска оптимальных пространственно-временных управлений может быть сформулирована как проблема совместного проектирования и управления объектом с целью обеспечения его оптимального функционирования в соответствии с выбранными критериями оптимальности. Такая постановка задачи позволяет оценить предельные возможности оптимизации процессов, особенно в отношении электротехнологических комплексов, выпускающих ответственные изделия [8, 10, 11, 52, 75, 76].

Поиск оптимальных пространственно-временных управлений становится более сложным при переходе к более общему классу подвижных управляющих воздействий, которые включают в себя закон перемещения и параметры формы подвижного источника энергии или вещества, наряду со временем и пространственными координатами в качестве аргументов [11, 78].

Сравнительно эффективным алгоритмически точным методом решения типовых задач оптимального управления СРП является альтернансный метод, разработанный в Самарском государственном техническом университете [8, 20, 21, 23, 25, 27, 79]. Применительно к рассматриваемым в диссертации задачам, метод опирается на установленные свойства пространственных распределений температуры по объему заготовки в конце оптимальных процессов индукционного нагрева металла, подобные известным в математике свойствам наилучших приближений заданных функций к нулю [8, 20, 27]. Согласно этим свойствам, решение задачи оптимального проектирования и управления сводится к получению системы трансцендентных уравнений для точек с предельно допустимым отклонением температуры от заданной, число которых всегда не меньше числа искомых параметров оптимального процесса. Причем отклонения температуры в указанных точках оказываются знакопеременными, то есть обладают альтернансным свойством, а порядок их следования определяется спецификой рассматриваемого процесса. Теория альтернансного метода позволяет произвести процедуру точной редукции задачи параметрической оптимизации к решению трансцендентных систем уравнений, замкнутых относительно всех идентифицированных искомых параметров [8, 21, 23, 25, 27, 79]. Основным преимуществом данного метода по сравнению с описанными ранее способами решения задачи оптимального управления является его применимость практически к любому числу N уравнений ОРП и возможность распространения на разнообразные задачи оптимизации [8, 20].

В качестве основного метода в диссертационном исследовании используется альтернансный метод для разработки методики решения задачи оптимального проектирования индуктора и режимов его функционирования для процессов поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы [25, 26].

1.3 Содержательная постановка задачи диссертационного исследования и степень разработанности темы

На ранних этапах развития теории оптимизации процессов термообработки в печах были получены результаты, представленные в работах А.Г. Бутковского, С.А. Малого, Ю.Н. Андреева [48, 49, 80, 81], в которых рассматриваются задачи оптимального по различным критериям качества управления нагревом металла.

Основы теории оптимизации СРП, применительно к задачам управления температурными режимами 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. [1-6, 8, 10, 11, 13].

Основоположником теории температурных напряжений является физик Н.А. Умов, создавший общую теорию термоупругих явлений (1871 г). В работах И.А. Одингга методы термопластического упрочнения металлов и сплавов разработаны на базе дислокационной теории, предложенной им в 1959 году. В разработку теории термоупругости большой вклад внесли также работы С.П. Тимошенко (теория упругости), Н.Ю. Тайца, И.А. Биргера Н.Н. Лебедева, Б.Ф. Шорра, Дж. Уэйнера, Дж. Гудьера, Б. Гейтвуда, Б. Боли, С. Мэнсона, Г. Паркуса (в период начиная с 20-30-х г. и вплоть до 70-х г. XX века).

В прошлые десятилетия 20 века работы множества ученых, включая Ю.И. Сосинова, С.А. Яицкова, А.Э. Эрмана, П.М. Чайкина и М.Я. Смелянского, были направлены на изучение процессов индукционного нагрева цилиндрических деталей с учетом термических напряжений. В 90-х годах внесли значительный вклад в это направление исследований работы В.Б. Демидовича, А.С. Васильева, Н.Д. Морозкина, и В.В. Царевского. [12-14].

В начале 90-х годов в работе Э.Я. Рапопорта рассмотрены вопросы построения алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева изделий с учетом основных технологических ограничений [51].

В последние десятилетия большой вклад в исследования, посвященные проблеме оптимального проектирования индукторов по различным критериям оптимизации, представлены в работах А. Алиферова, П. Ди Барбы, М. Форцана, А.Н. Никанорова, Б. Наке, Д. Запаты, Т. Мэйнарда, С.А. Галунина, Э. Бааке, Т. Леука, С. Наджи, Л. Якубовичевой, А. Гашпареца, Э.Я. Рапопорта, В.Б. Демидовича, А.Б. Кувалдина, А.Р. Лепешкина и др. [7-18].

Моделированию и исследованию полей термических напряжений посвящены работы Кувалдина А.Б. и Лепешкина А.Р. [15-18]. Основы математической теории термовязкоупругости описаны в работах Ильюшина А.А., Победря Б.Е. [82].

Вопросам высокочастотной термической обработки посвящены работы Головина Г.Ф. и Замятина М.М. [83]. В работе Перевалова Ю.Ю. [84] представлено

моделирование и разработка автоматизированной индукционной закалочной установки крупногабаритных валков прокатных станов.

Работа коллектива авторов Ligang Liu, Qiang Li, Xiaohei Liu, Yukui Gao b, Xuejun Ren, Bo Liao, Qingxiang Yang [85] представляет исследование, посвященное численному моделированию полей напряжений и температур заготовок с различным содержанием углерода в процессе закалки. В представленных моделях учитывалась связь между тепловым полем, полем фазовых превращений и полем напряжений, а при моделировании напряжений учитывались изменения термомеханических параметров материала в зависимости от содержания углерода и температурного распределения.

В статье [86] коллектива авторов Yang Jintang, Qu Haiduan, Li Gongfa, Zhang Xiaoliang представлена численная модель процесса закалки стальной рельсы, построенная в ППП ANSYS, приведен расчет критических скоростей охлаждения в зависимости от состава и содержания химических элементов в стали.

В работе [87] Белого А.В., Карпенко Г.Д., Мышкина Н.К. рассмотрена проблема износостойкости поверхностных слоев с позиции теории трения, материаловедения и технологии обработки металлов.

В работе [88] N. Barka, A. Chebak, и J. Brousseau рассмотрен процесс оптимизации теплового поля по критерию наилучшей равномерности на стадии нагрева заготовки сложной геометрической формы.

В работах Э. Я. Рапопорта и Ю.Э Плешивцевой [8, 10, 11, 51] приведено наиболее полное описание методов проектирования и оптимального управления СРП, в которых управляемая функция состояния представляет собой изменение температурного поля по пространственной и временной координате в процессе индукционного нагрева.

В работе Попова А.В. [20] представлено сравнение решений задач оптимизации конструктивных и режимных параметров индуктора, полученных на основе численных многомерных моделей с помощью генетических алгоритмов [89, 90] и альтернативного метода [8,79].

Работа [91] посвящена оптимальному по критерию точности проектированию нагревательной установки нагрева стальных труб для снижения растягивающих термических напряжений [20]. В [89] показано решение задачи поиска оптимального дизайна индуктора с помощью метода деформируемого многогранника (Нелдера-Мида). Исследования, проведенные А.В. Обуховой и Н.Н. Клочковой [92, 93], посвящены

оптимальному проектированию индукторов, способных обеспечить максимально равномерный нагрев местных участков металлических заготовок сложной геометрической формы. Значительные результаты в области оптимизации конструкции нагревательных установок для поверхностной закалки были достигнуты в работах А.Н. Никанорова и С.А. Галунина с использованием генетических алгоритмов [94-96].

Работы Бояркина В.В., Родмана Д. [97, 98] посвящены моделированию и оптимизации процесса закалки шестерен из стали при использовании программной среды Ansys Workbench; в них представлено возможное прогнозирование аустенитно-мартенситного превращения, определение твердости, упругопластической деформации и остаточных напряжений по объему детали сложной геометрической формы.

Анализ представленных исследований свидетельствует о наличии значительного научного теоретического и практического задела в области задач поиска оптимальных параметров конструкции индукционных нагревательных систем, описываемых аналитическими и численными проблемно-ориентированными моделями процессов индукционной термической обработки. Большинство задач оптимизации процессов и установок индукционного нагрева решается с помощью современных методов оптимизации. Однако, несмотря на имеющийся существенный научный задел, следует отметить, что представленная тематика исследований является чрезвычайно широкой и проблемы оптимального проектирования и управления режимами работы индукторов для нагрева и термообработки изучены далеко не в полном объеме.

В диссертационной работе Попова А.В. [20] разработаны методики и алгоритмы решения задачи оптимального проектирования индуктора для закалки цилиндрических заготовок с учетом ограничений на максимально допустимую температуру. Однако, в работе не рассматриваются принципиальные проблемы, связанные с поверхностной индукционной закалкой изделий сложной геометрической формы, и не исследуются термические напряжения, рассмотрение которых обязательно при закалке деталей сложной формы из-за критически возрастающей неравномерности распределения внутренних электромагнитных источников тепла по объему заготовки [26].

Учитывая имеющийся научный задел и существующие проблемы в области исследований, основное внимание в диссертационном исследовании уделено совместной оптимизации алгоритмов управления и конструкции индуктора для повышения качества поверхностной закалки стальных деталей сложной геометрической

формы путем обеспечения максимально равномерного нагрева упрочняемого слоя при отсутствии в нем локальных перегревов и превышения пределов допустимых термических напряжений. Для этого стадия поверхностного индукционного нагрева рассматривается как объект управления с распределенными параметрами. Анализ взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, а также полей термических напряжений в процессе нагрева стальных заготовок выполняется на основе численной двумерной нелинейной модели системы «индуктор-заготовка», разработанной в ANSYS Mechanical APDL.

Помимо разработки модели стадии нагрева задачей диссертации также является разработка численной двумерной нелинейной модели процесса охлаждения, включающая взаимосвязанный расчет тепловых полей и полей термических напряжений. Расчет тепловых полей стадии охлаждения выполняется по упрощенной методике с использованием эквивалентного коэффициента теплоотдачи с поверхности заготовки, рассчитанного на основе экспериментальных данных, полученных на установке для интенсивного водяного охлаждения [35,99]. Модель позволяет оценить основные показатели процессов для дальнейших исследований и оптимизации стадии охлаждения.

В работе рассматриваются процессы поверхностной закалки изделий сложной формы, к которым можно отнести втулки, редукторы, зубчатые колёса и валы-шестерни, цепные приводные звёздочки, кулачки, суппорта, шпиндели и прочие детали, подвергающиеся в процессе эксплуатации нагрузкам и трению. Принимая во внимание специфические особенности геометрии заготовок и, в частности, наличие прямоугольного выступа, для закалочного индуктора предлагается использовать многовитковую катушку. Для оптимизации проектных решений и режимов функционирования индукционной установки предлагается сформулировать задачу совместной оптимизации конструктивных параметров витков и управления током индуктора на стадии поверхностного нагрева под закалку. В качестве критерия оптимизации целесообразно выбрать критерий, минимизирующий максимально возможное абсолютное отклонение температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя от заданного значения.

Одной из особенностей процесса поверхностной индукционной закалки является высокоскоростной нагрев поверхностного слоя заготовки сложной формы до

температур выше точки Кюри, что может привести к локальному перегреву или к значениям термических напряжений выше допустимых. Для решения задачи оптимизации с учетом ограничений на максимально допустимые значения температур и термонапряжений предлагается разработать методику, основанную на итерационном процессе поиска решения, включающем следующие этапы:

- решение на основе альтернансного метода задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений;

- поиск алгоритма управления током индуктора на особом участке движения по ограничениям;

- повторное решение на основе альтернансного метода задачи совместной оптимизации с учетом найденного алгоритма управления.

Решение на основе альтернансного метода задачи совместной оптимизации с учетом технологических ограничений позволяет получить допустимые переходные и остаточные напряжения, снизить пик нежелательных растягивающих напряжений, снизить риск появления микротрещин в процессе эксплуатации оборудования. Эти преимущества значительно увеличивают срок службы деталей и повышают их качество.

Для реализации разработанных в диссертации методик решения задач оптимального проектирования и управления в пакете для решения инженерных задач MATLAB предлагается построить автоматизированные процедуры оптимизации, предусматривающие возможность интеграции ANSYS моделей в итерационные процессы поиска решений. Разработанные методики предлагается апробировать 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 L-образной формы по окончании стадии индукционного нагрева под закалку с учетом технологических ограничений на локальные перегревы и превышение пределов термонапряжений. Предлагается вариант технической реализации алгоритма управления на участке движения по ограничению на максимально допустимую температуру поверхностного слоя нагреваемой детали.

1.4 Выводы по первой главе

1. В первой главе выполнен обзор современного состояния проблемы исследования, представлены примеры индукционных нагревательных установок для

нагрева под закалку ответственных изделий со специфическими особенностями конструктивного исполнения. Рассмотрена важная технологическая проблема формирования максимально равномерного температурного распределения при поверхностной индукционной закалке деталей сложной геометрической формы.

2. Рассмотрены особенности физических процессов, возникающих при поверхностной индукционной закалке стальных заготовок. Проанализированы основные факторы, которые необходимо учитывать при проектировании витков индуктора и выборе режимов его работы для закалки заготовок различной геометрической формы.

3. Выполнен обзор основных методов оптимизации электротехнологических СРП, применяемых в задачах оптимального программного управления, дана их краткая характеристика, указаны основные преимущества и недостатки, связанные с их использованием при решении задач оптимизации ОРП. Обоснован выбор альтернативного метода параметрической оптимизации СРП как теоретической основы, используемой в диссертационной работе для решения задачи совместной оптимизации конструктивных и режимных параметров индуктора после ее точной редукции к задаче математического программирования.

4. Проанализированы работы отечественных и зарубежных исследователей в области оптимизации энерготехнологических систем индукционного нагрева, предназначенных для термообработки металлических изделий разного назначения, которые свидетельствуют о высоком потенциале применения методов оптимизации СРП для улучшения технико-экономических показателей индукторов и совершенствования качества технологических процессов. Однако, несмотря на значительный задел научных исследований в этой области, в работах не уделено достаточного внимания проблемам, связанным с поверхностной индукционной закалкой деталей сложной геометрической формы и с оценкой полей термических напряжений, обладающим особенностями, которые требуют дополнительного исследования.

5. Анализ степени разработанности темы исследования позволил определить содержательную постановку задачи оптимизации проектных решений и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева заготовок сложной геометрической формы под поверхностную закалку, которая формулируется и решается в диссертационном исследовании в терминах теории управления системами распределенными параметрами.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

Данная глава посвящена численному моделированию стадий нагрева и охлаждения процесса поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы с угловой зоной [26]. Приведен анализ современных программных пакетов для численного моделирования, обоснован выбор ППП ANSYS Mechanical APDL [100], как основного инструмента для конечно-элементного анализа мультифизических процессов в диссертационной работе. Разработан алгоритм построения осесимметричной двумерной модели исследуемого процесса на стадиях нагрева и охлаждения, описаны нелинейные теплофизические свойства материала заготовки. В ходе исследования проанализировано влияние типовой конструкции витков индуктора и режимов работы индукционного нагревателя на распределение температуры в поверхностном слое угловой зоны ступенчатой втулки из типовой углеродистой стали марки С40. Проведена верификация модели путем сравнения результатов моделирования стадии индукционного нагрева, полученных в ANSYS Mechanical APDL и в программном пакете Altair FLUX [103].

2.1 Современные программные средства моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей и термонапряженных состояний

Появление программных пакетов для численного моделирования и анализа процессов, происходящих в индукционных нагревательных установках, способствовало упрощению поиска решений сложных взаимосвязанных мультифизических задач конечно-элементного анализа. Расширение ассортимента изделий, подвергаемых термической обработке и необходимость увеличения эффективности и качества их производства, неизменно требуют более быстрого и точного поиска решения оптимизационных задач, которое невозможно реализовать без численного моделирования.

Выбор программного пакета для численного моделирования зависит от множества факторов, среди которых можно выделить проблемную ориентированность задачи, требуемые функциональные возможности программного пакета, удобство его использования, открытость и доступность, ограничения на временные и вычислительные ресурсы и др. [20]. Приоритет выбора программы устанавливается в

соответствии с набором функциональных возможностей, необходимых для моделирования процессов индукционного нагрева, а также с точки зрения возможности интеграции модели в оптимизационную процедуру.

На сегодняшний день существуют современные программные решения для численного моделирования, которые можно классифицировать на две основные категории: коммерческие программные пакеты и программные пакеты с открытым исходным кодом, также известные как бесплатные программы под определенными условиями использования. В настоящий момент появилось большое количество коммерческих предложений на рынке программных продуктов для численного моделирования, к которым можно отнести COMSOL Multiphysics, ANSYS, Altair FLUX, SolidWorks, Abaqus, NX CAE, Femap, Elcut [100, 103-107]. К условно бесплатным программам можно отнести: Agros2D, Elmer, FreeFEM++, ONELAB и OpenFOAM [108-112].

Основными преимуществами коммерческих программ являются расширенная техническая поддержка, официальные обновления и сотрудничество компании с заказчиком, удобный графический интерфейс пользователя, а также их ориентированность на решение определенных классов инженерных задач. Пакеты с открытым исходным кодом в большинстве случаев дорабатываются пользователями, что позволяет им расширить решаемый класс задач численного моделирования. При этом доработка программных модулей требует более глубокого изучения и понимания правил и инструментов разработки кодов, настройки конкретных функций, необходимых для построения модели физического процесса.

В [20] представлен сравнительный анализ функциональных возможностей различных конечно-элементных программных комплексов ANSYS, FLUX, Abaqus, Elcut, Comsol, Agros2D, Elmer, FreeFEM, ONELAB, OpenFOAM [20], на основе которого сделан вывод, что большинство из перечисленных программных продуктов обладают необходимым инструментарием для моделирования стационарных и изменяющихся во времени взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей. В наиболее популярных пакетах для расчетов применяется метод конечных элементов, который, как продемонстрировано в [113], обладает достаточной точностью расчета, возможностью описания криволинейных границ моделируемых областей любой сложности [20].

Большинство программных пакетов для численного моделирования обладают аналогичными функциональными возможностями, такими как взаимосвязанный мультифизичный анализ, возможность задания нелинейных свойств материалов, взаимосвязанные электромагнитные и тепловые расчеты. Однако не во всех программных продуктах есть функционал для проведения полноценного прочностного анализа, а при выборе программы для моделирования процесса закалки его наличие является одним из ключевых условий.

По ряду изложенных причин, а также из-за универсальности, надежности, наличия полной документации, расширенного функционала и интерфейса, возможности решения широкого спектра взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и упругопластических задач, а также других преимуществ перед пакетами с открытым программным кодом, в качестве инструмента численного моделирования в диссертационной работе был выбран ППП ANSYS Mechanical APDL.

В последующих разделах главы подробно описан процесс построения численных моделей стадии поверхностного индукционного нагрева и охлаждения в пакете прикладных программ ANSYS Mechanical APDL.

2.2 Численное моделирование процессов нагрева и охлаждения в ППП ANSYS Mechanical APDL

Для исследования процессов индукционного нагрева под поверхностную закалку разработана двумерная численная осесимметричная модель системы “индуктор – заготовка”, включающая взаимосвязанный расчет электромагнитной, тепловой и упругопластической задач в ППП ANSYS Mechanical APDL [26]. Как подробно описано в первой главе (раздел 1.1), процесс индукционной закалки состоит из стадии скоростного индукционного нагрева и интенсивного водяного охлаждения, которые моделируются в работе. Процессы, происходящие на стадии индукционного нагрева, можно описать сложными нелинейными взаимосвязанными уравнениями для моделирования электромагнитных полей, тепловых полей, полей термических напряжений и полей упругопластических деформаций. Процессы, происходящие на стадии охлаждения, можно описать сложными нелинейными взаимосвязанными уравнениями для моделирования температурных полей и полей термических напряжений.

В общем виде процесс периодического индукционного нагрева заготовок может быть представлен взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье, описывающей поведение электромагнитного и теплового полей [8], дополненной краевыми условиями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \sigma(T) \bar{E}; & \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0; & \operatorname{div} \bar{E} &= 0; \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\bar{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \bar{E}; \quad \bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H}; \quad \bar{J} = \sigma \bar{E};$$

$$\alpha(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\beta(T) \operatorname{grad} T) + F(\bar{x}, T, u), \quad (2.2)$$

$$t \in (0, \tau^0); \quad \bar{x} \in \Omega_r \subset E^2, \quad 1 \leq r \leq 3.$$

$$T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}); \quad \beta(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\bar{x} \in S} = F_1(\bar{x}, t, T) \Big|_{\bar{x} \in S}, \quad (2.3)$$

где \bar{H} – вектор напряженности магнитного поля; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость; \bar{E} – вектор напряженности электрического поля; \bar{D} – вектор плотности электрического потока; t – время; \bar{B} – вектор плотности магнитного потока; $T(\bar{x}, t)$ – пространственно-временное распределение температуры; \bar{x} – вектор пространственных координат; α, β – заданные функции своих аргументов ($\alpha(T)$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; $\beta(T)$ – теплопроводность); $F(\bar{x}, T, u)$ – удельная мощность внутренних электромагнитных источников тепла; $F_1(\bar{x}, t, T)$ – тепловой поток, направленный на поверхность нагреваемого тела, n – нормаль к граничной поверхности S области $\bar{x} \in \Omega_r$; $u(\bar{x}, t)$ – управляющее воздействие; $T_0(\bar{x})$ – начальное распределение температуры по объему заготовки, τ^0 – время окончания стадии нагрева [8].

Исследование стадии индукционного нагрева сопровождается анализом термических напряжений, возникающих в материале как на стадии нагрева, так и на стадии охлаждения. При индукционном нагреве основное внимание уделяется растягивающим напряжениям, т.к. при их превышении нарушается целостность металла и появляются дефекты, в т.ч. микротрещины [114]. Сжимающие напряжения, в свою очередь, наоборот приводят к тому, что повышают прочностные свойства заготовок.

Для определения технологических ограничений, предъявляемых к процессу индукционного нагрева заготовок с целью учета предотвращения появления

недопустимых термонапряженных состояний, необходимо провести анализ диаграммы растяжения для исследуемого материала [19]. На рисунке 2.1 представлена диаграмма испытания изделий из типовой стали в координатах σ - напряжение, ε – относительное растяжение.

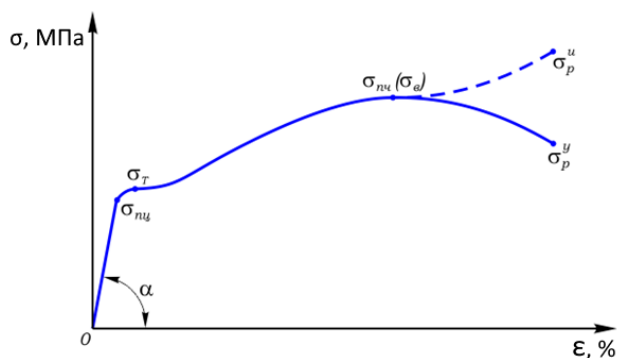


Рисунок 2.1 – Диаграмма условных и истинных растяжений для типовой низкоуглеродистой стали

Кривые на диаграмме состоят из следующих участков:

1. Участок 0 - $\sigma_{нц}$ – зона упругости, в пределах которой напряжения рассчитываются по закону Гука, принимающему для линейных температурных деформаций следующий вид [16, 19, 115]:

$$\varepsilon = \frac{1-2\nu}{E} \sigma + \alpha_T \cdot \Delta T, \quad (2.4)$$

где E – модуль упругости, ΔT – изменение температуры при нагреве, ν – коэффициент Пуассона, α_T – коэффициент температурного расширения, $\varepsilon = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ – средняя деформация, $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ – средние напряжения, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – компоненты деформаций по соответствующим координатам x , y и z , $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненты напряжений по координатам x , y и z [16, 19, 115].

Напряжения в зоне упругости значительно возрастают при незначительном изменении удлинения и зависят от формы и размеров заготовки, а также от физических свойств стали.

2. Участок $\sigma_{нц}$ – $\sigma_{т}$ – зона пластической деформации, которая сохраняется при отсутствии нагрузки. На данном участке угол наклона кривой на диаграмме существенно снижается, т.е. деформации продолжают расти без существенного роста нагрузки. Этот участок диаграммы растяжений называют зоной текучести, т.к. по всей рабочей длине образца образуются пластические деформации. В случаях, когда на

диаграмме нет в явном виде зоны текучести, ее определяют с помощью условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, равном величине напряжений, при которых относительные остаточные деформации составляют 0,2%. После превышения предела текучести в металле образца начинают происходить необратимые изменения, перестраивается кристаллическая решетка металла, появляются значительные пластические деформации [16, 19, 115].

3. Участок $\sigma_T - \sigma_{пч}$ соответствует зоне упрочнения, в пределах которой удлинение образца сопровождается возрастанием нагрузки, но значительно более медленным, чем в зоне упругости. На этой стадии намечается место будущего разрыва детали [16, 19, 115].

4. В зоне местной текучести (на участке $\sigma_{пч} - \sigma_p$) происходит значительное удлинение исследуемого образца с уменьшением напряжения: σ_p — напряжение в момент разрыва образца (σ_{py} — условное и σ_{pi} — истинное) [16, 19, 115].

Наиболее часто используемой и распространенной для расчета пластического состояния изделия является деформационная теория Генки-Ильюшина, в основу которой положено следующее уравнение [16, 115]:

$$\{\varepsilon\} = \psi \frac{1+\nu}{E} \{\sigma\}, \quad (2.5)$$

где $\{\varepsilon\}$ — вектор-девиатор деформаций, $\{\sigma\}$ — вектор-девиатор напряжений, ψ — относительное сужение поперечного сечения образца.

Деформации $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}$ определяются следующими выражениями

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) + \alpha T \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) + \alpha T \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xy} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) + \alpha T \quad (2.9)$$

Общая постановка плоской задачи термоупругости в декартовых координатах заключается в определении восьми функций $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, u_x, u_y$, удовлетворяющих при отсутствии объемных сил двум уравнениям равновесия (2.10), трем соотношениям между деформациями и напряжениями (2.6-2.9) и трем соотношениям между деформациями и перемещениями (2.11) [82]:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

В области пластических деформаций соотношения между напряжениями и деформациями определяется с помощью сложных нелинейных зависимостей, подчиненных общему векторному уравнению пластичности Генки-Ильюшина (2.5) [19, 115].

Анализируя диаграмму растяжения, представленную на рисунке 2.1, становится очевидным, что предел текучести может быть использован в качестве технологически допустимого значения максимального термического напряжения. Это значение является критическим при снятии нагрузки, так как при его превышении могут возникнуть остаточные деформации [19, 115-117]. Подобное наблюдение позволяет провести количественную оценку термических напряжений в данной диссертационной работе с использованием максимального растягивающего напряжения, которое было рассчитано с применением программы ANSYS Mechanical APDL.

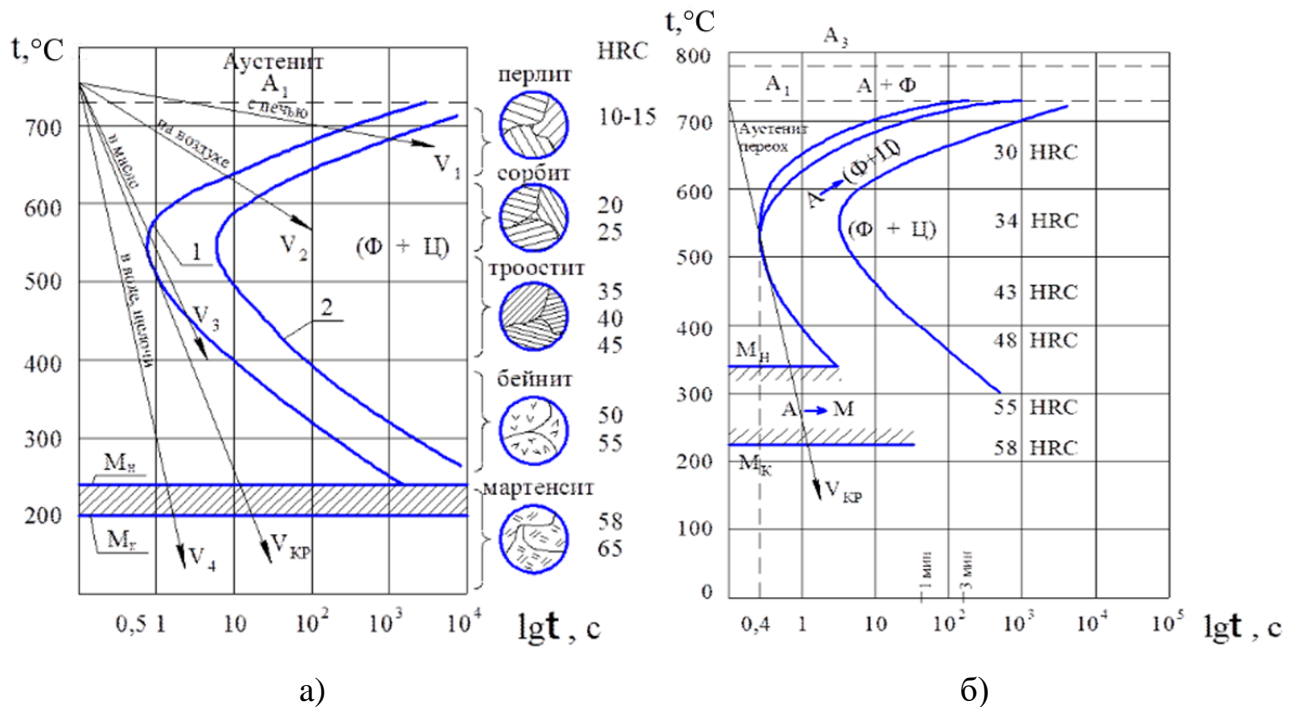
Интенсивное водяное охлаждение часто применяют на практике для поверхностной закалки после индукционного нагрева. Для этого используют специальные разбрызгиватели, которые подают жидкость под давлением на поверхность заготовки. При таком способе охлаждения теплообмен с окружающей средой происходит значительно интенсивнее, что очень важно для формирования мартенситной микроструктуры, которая достигается высокой скоростью охлаждения детали (не ниже критической $V_{кр}$) [26]. Высокая интенсивность теплообмена происходит благодаря отсутствию паровой прослойки, которая разрушается из-за кинетической энергии струй, и большой скорости перемещения воды относительно охлаждаемой поверхности [26]. Интенсивность охлаждения может изменяться в широких пределах за счет изменения количества смеси и ее скорости истечения из форсунки. Очевидный недостаток такого способа охлаждения – периодическая очистка отверстий разбрызгивателей [26]. Вода должна быть достаточно чистой, т.к. окалина и другие механические примеси могут очень быстро засорить отверстия [26, 99]. Охлаждение в процессе закалки приводит к появлению температурного градиента по сечению деталей, величина которого определяется температурой нагрева, размерами и формой детали,

температуропроводностью стали, охлаждающей способностью закалочной среды и интенсивностью ее подачи.

Неоднородность изменения температуры по сечению обрабатываемой заготовки при охлаждении, наряду с неодновременностью протекания фазовых превращений, сопровождающихся изменением удельного объема, приводит к возникновению термических напряжений, возникающих вследствие неодновременной тепловой деформации [99].

Процессы термической обработки протекают при разных скоростях охлаждения и требуют различного времени. Для описания кинетики (развитие процесса во времени или скоростной зависимости) превращения переохлажденного аустенита пользуются экспериментально полученными диаграммами изотермического превращения аустенита, показывающими, изменение микроструктуры аустенита с течением времени при различных постоянных температурах.

На рисунке 2.2 изображена диаграмма изотермического превращения стали марки 45. Согласно представленной диаграмме, для изотермического превращения аустенита требуется высокоскоростное изменение температуры на поверхности и вдоль границы закаливаемого слоя стальной заготовки для предотвращения перлитного превращения аустенитной микроструктуры.



а – для стали 0,8 % С: 1 – линия начала распада аустенита; 2 – линия конца распада аустенита; M_{H} – температура начала мартенситного превращения; M_{K} – температура

конца мартенситного превращения; V_1, V_2, V_3, V_4 – скорости непрерывного охлаждения;
 $V_{кр}$ – критическая скорость закалки (минимальная скорость охлаждения, при которой
образуется мартенсит) б – для стали 45 (0,45% С)

Рисунок 2.2 – Диаграмма изотермического превращения аустенита

Для исследования стадии охлаждения под поверхностную закалку разработана двумерная численная осесимметричная модель системы, включающая взаимосвязанный расчет тепловой и упругопластической задачи в ППП ANSYS Mechanical APDL [26]. Температурное распределение по сечению заготовки, полученное в конце стадии нагрева, использовано в качестве начального распределения для моделирования стадии охлаждения.

Расчет стадии охлаждения в задаче реализован при использовании эквивалентного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{экр}$ с поверхности, описанного в работе [99], что значительно упрощает расчеты. Эквивалентный коэффициент теплоотдачи представляет собой средние значения коэффициента поверхностного теплообмена в диапазоне температур $800^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$. Кроме того, эквивалентный коэффициент теплоотдачи помогает оценить влияние критических факторов и изменять режимы работы распыляющего устройства в зависимости от требуемой интенсивности охлаждения. Эксперименты показывают, что при охлаждении водяным душем в диапазоне от 0,1 до $1,0 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ $\alpha_{экр}$ можно аппроксимировать с помощью следующего уравнения [99]:

$$\alpha_{экр} = A_B + 10^5 B_B M, \quad (2.12)$$

где A_B и B_B – коэффициенты, являющиеся функциями относительной площади отверстий в спрейерах K распыления охлаждающей жидкости [99].

В зависимости от специфики применения, A_B обычно колеблется в пределах от $2\cdot 10^3$ до $6\cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, а коэффициент B_B колеблется в пределах от 1,12 до 1,25, принимая максимальное значение при $K \approx 0,15$ [99]. Предполагается, что струйное охлаждение попадает на поверхность под углом 90° , а расстояние между распыляющим устройством и поверхностью заготовки составляет 10–15 мм [99]. В работе [99] приведены расчетные зависимости эквивалентного поверхностного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{экр}$ для охлаждения водяным распылением, представляющего собой комплексную функцию скорости V истечения воды через охлаждающие отверстия, параметра расхода воды M и относительной площади отверстия K для подачи охлаждающей среды.

В диссертации для закалки распылением очищенной воды коэффициент поверхностной теплоотдачи $\alpha_{эке}$ рассчитывается в зависимости от температуры поверхности стального образца и параметра расхода воды $M=1.2, \text{ м}^3/(\text{с}*\text{м}^2)$. Параметр M представляет собой отношение количества охлаждающей жидкости, такой как вода ($\text{м}^3/\text{с}$), к площади заготовки (м^2), подвергаемой закалке [26, 99].

2.2.1 Алгоритм моделирования

Процесс построения численной модели в ANSYS Mechanical APDL [100], который может быть выполнен при помощи специализированного языка программирования ANSYS APDL или через графический интерфейс программы, в общем случае состоит из следующих основных этапов:

- определение типа решаемой задачи;
- определение физических свойств материалов;
- создание геометрии моделируемой системы;
- присвоение соответствующих свойств областям, подбор типа конечного элемента и формирования конечно-элементной сетки;
- задание начальных и граничных условий.

Как указано в п 2.2, в работе моделируется процесс поверхностной индукционной закалки изделий сложной геометрической формы, включающий взаимосвязанные процессы на стадиях нагрева и охлаждения, которые можно описать уравнениями электромагнитных полей, тепловых полей и полей термических напряжений (2.1) – (2.11).

В качестве исходных данных для моделирования задаются следующие свойства материалов в виде постоянных и нелинейных зависимостей, представленных в табличной форме (таблицы 2.1 – 2.3): для электромагнитного анализа – магнитная проницаемость и удельное сопротивление; для теплового анализа – удельная теплоемкость, коэффициент линейного температурного расширения, коэффициент теплопроводности; для прочностного анализа – модуль Юнга, коэффициент Пуассона и билинейная модель пластичности [19, 26].

На рисунке 2.3 схематично представлен разработанный в диссертации алгоритм моделирования процесса индукционной закалки, определяющий последовательность решения задач на стадиях нагрева и охлаждения.

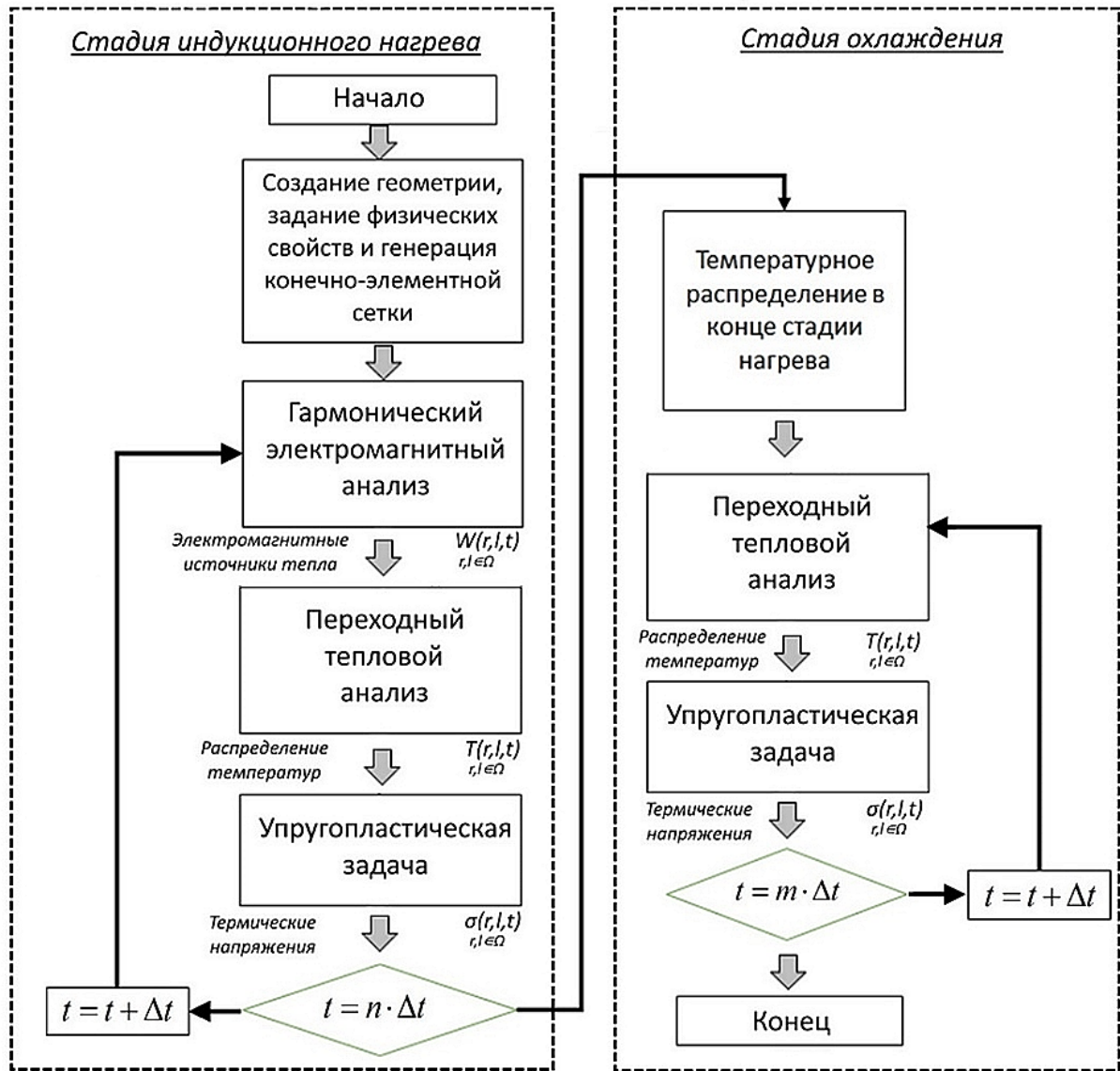


Рисунок 2.3 – Последовательность решения задач моделирования процесса индукционной закалки

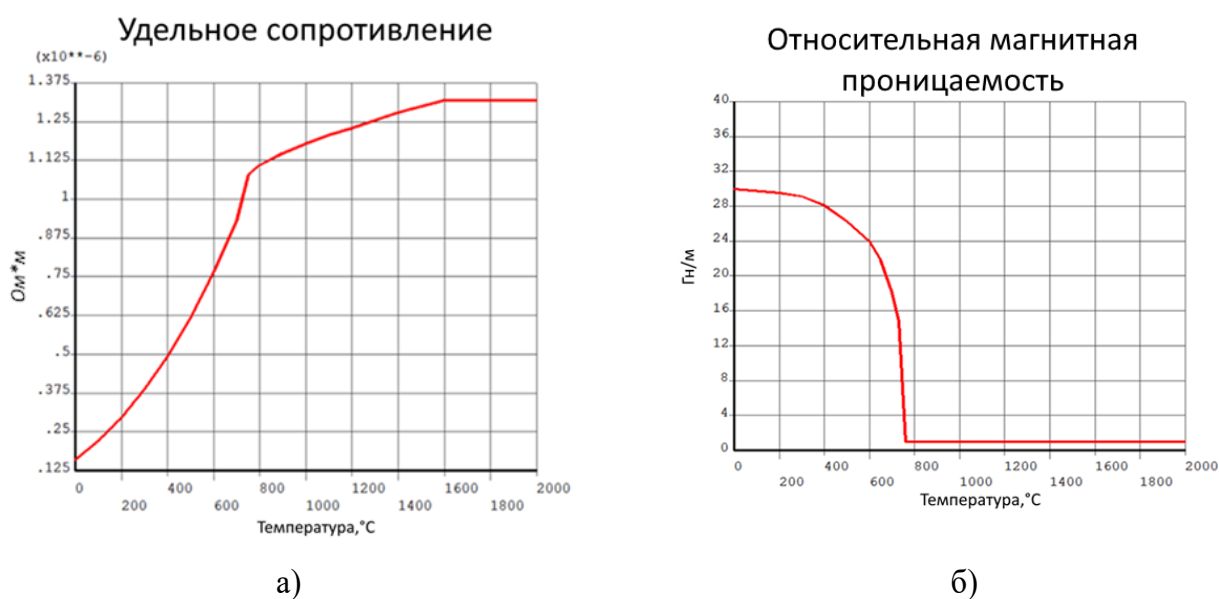
Свойства материалов, используемые для решения электромагнитной задачи, представлены в таблице 2.1 [124, 125].

Таблица 2.1 – Теплофизические свойства материалов для решения электромагнитной задачи

| Температура (MURX), °C | Магнитная проницаемость, (MURX) | Температура (RSVX), °C | Сопротивление заготовки, (RSVX), Ом·м | Сопротивление проводника с током (RSVX), Ом·м |
|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------------|---|
| 0 | 30.0 | 0 | 16.0e-08 | 2.0e-08 |
| 200 | 29.54 | 100 | 22.1e-08 | |
| 300 | 29.13 | 200 | 29.6e-08 | |

| | | | | |
|------|-------|------|-----------|--|
| 400 | 28.11 | 300 | 38.7e-08 | |
| 500 | 26.29 | 400 | 49.3e-08 | |
| 600 | 23.94 | 500 | 61.9e-08 | |
| 650 | 21.79 | 600 | 76.6e-08 | |
| 700 | 18.08 | 700 | 93.2e-08 | |
| 730 | 14.75 | 750 | 107.9e-08 | |
| 760 | 1.0 | 800 | 111.1e-08 | |
| 2000 | 1.0 | 900 | 114.9e-08 | |
| | | 1000 | 117.9e-08 | |
| | | 1100 | 120.7e-08 | |
| | | 1200 | 123.0e-08 | |
| | | 1400 | 128.0e-08 | |
| | | 1600 | 132.0e-08 | |
| | | 2000 | 132.0e-08 | |

На рисунках 2.4 – 2.6 в графическом виде представлены основные нелинейные свойства стали, используемые для решения электромагнитной, тепловой и упругопластической задач.



а – зависимость электрического сопротивления от температуры; б – зависимость магнитной проницаемости от температуры

Рисунок 2.4 – Свойства стали для решения электромагнитной задачи в ANSYS
Задание свойств материалов, необходимых для моделирования процессов, а также других исходных данных реализовано при помощи языка программирования APDL.

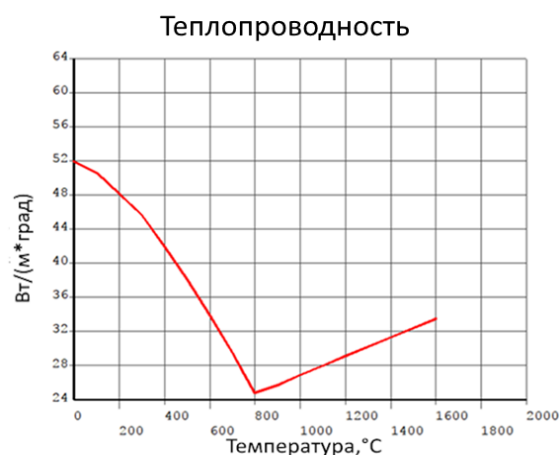
Свойства материалов, используемые для решения тепловой задачи, представлены в таблице 2.2 [124, 125].

Таблица 2.2 – Теплофизические свойства углеродистой стали марки 40 для решения тепловой задачи

| Температура (KXX), °C | Теплопроводность, (KXX), Вт/м/°K | Температура (C), °C | Удельная теплоемкость, С, Дж/кг/°K | Плотность стали (DENS), кг/м ³ |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------------|---|
| 0 | 51.9 | 0 | 480 | 7800 |
| 100 | 50.6 | 100 | 490 | |
| 200 | 48.1 | 200 | 520 | |
| 300 | 45.6 | 300 | 560 | |
| 400 | 41.9 | 400 | 600 | |
| 500 | 38.1 | 500 | 670 | |
| 600 | 33.8 | 600 | 750 | |
| 700 | 29.5 | 700 | 830 | |
| 750 | 27.0 | 750 | 1460 | |
| 800 | 24.8 | 800 | 930 | |
| 900 | 25.7 | 900 | 650 | |
| 1000 | 26.9 | 1000 | 660 | |
| 1100 | 28.0 | 1100 | 670 | |
| 1200 | 29.1 | 1200 | 680 | |
| 1400 | 31.3 | 1300 | 690 | |
| 1600 | 33.5 | 1400 | 700 | |
| 2000 | 33.5 | 1450 | 2000 | |
| | | 1475 | 3000 | |
| | | 1500 | 780 | |
| | | 1600 | 800 | |



а)



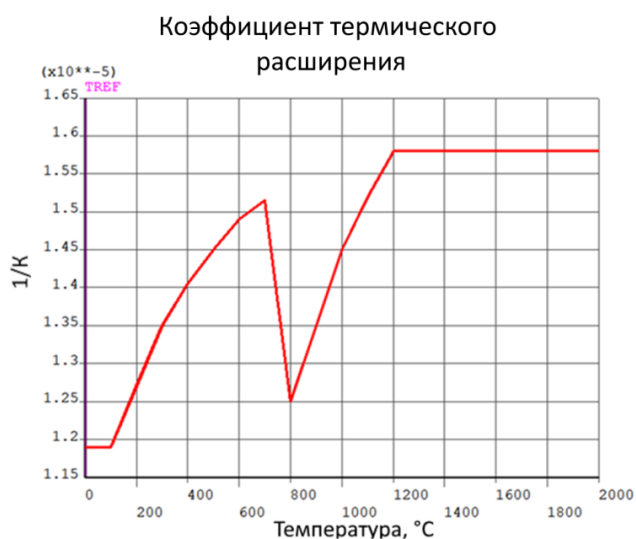
б)

а – зависимость удельной теплоемкости от температуры; б – зависимость теплопроводности от температуры

Рисунок 2.5 – Свойства стали для решения тепловой задачи в ANSYS

Таблица 2.3 – Теплофизические свойства стали 40 для решения упругопластической задачи

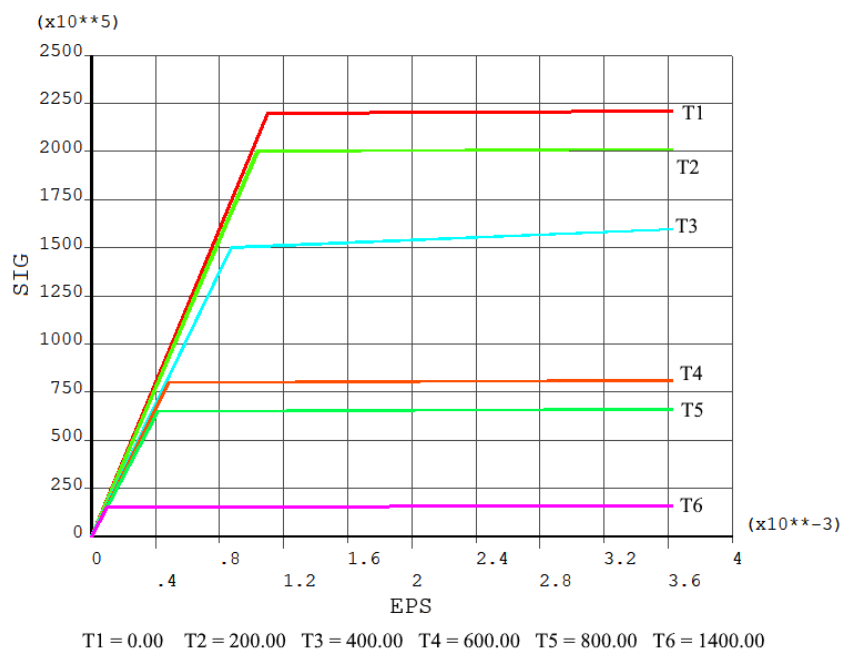
| Температур а (APLX), °C | Коэффициент теплового расширения (APLX), K ⁻¹ | Температур а (EX), °C | Модуль Юнга (EX), Па | Температур а (SIG/EPS), °C | Предел текучести (Yield stress), Па | Модуль касательной (Tangent modulus), Па |
|-------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|---|
| 0 | 11.9e-6 | 0 | 213e+9 | 0 | 2.2E+08 | 4.3E+08 |
| 50 | 11.9e-6 | 20 | 213e+9 | 200 | 2E+08 | 4E+08 |
| 100 | 11.9e-6 | 100 | 210.0e+9 | 400 | 1.5E+08 | 3.5E+09 |
| 200 | 12.7e-6 | 200 | 198e+9 | 600 | 8E+07 | 3E+08 |
| 300 | 13.5e-6 | 300 | 190e+9 | 800 | 6.5E+07 | 2.5E+08 |
| 400 | 14.05e-6 | 400 | 185e+9 | 1400 | 1.5E+07 | 1.8E+08 |
| 500 | 14.5e-6 | 500 | 179e+9 | | | |
| 600 | 14.9e-6 | 600 | 167e+9 | | | |
| 700 | 15.15e-6 | 700 | 160e+9 | | | |
| 800 | 12.5e-6 | 1000 | 150e+9 | | | |
| 900 | 13.5e-6 | 2000 | 148e+9 | | | |
| 1000 | 14.5e-6 | | | | | |
| 1100 | 15.2e-6 | | | | | |
| 1200 | 15.8e-6 | | | | | |
| 2000 | 15.8e-6 | | | | | |



а)



б)



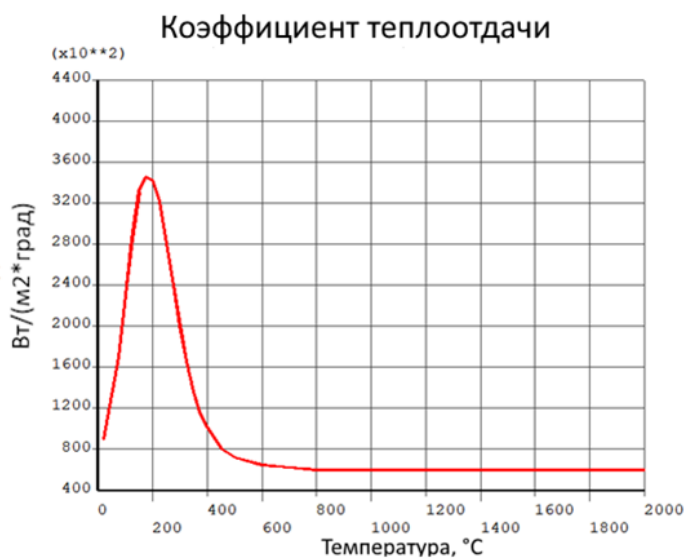
в)

а – коэффициент теплового расширения (ALPX); б – модуль упругости Юнга (EX);
в – билинейная модель пластичности при использовании предела текучести (Yield stress)
и модуля касательной упругости (Tangent modulus)

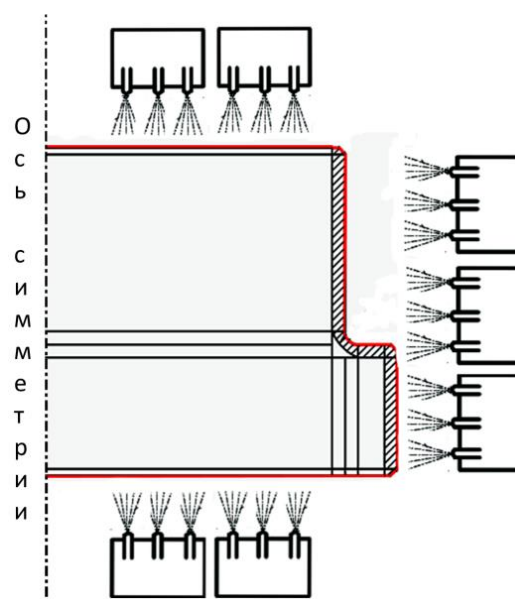
Рисунок 2.6 – Свойства стали для решения упругопластической задачи в ANSYS

В работе при расчете термических напряжений используется коэффициент Пуассона для изотропного материала (NUXY) равный 0.28, который для стали находится в пределах 0.25...0.30.

Как показано в пункте 2.2, для оценки температур и особенно термических напряжений при поверхностной закалке необходимо построить модель стадии охлаждения. При анализе изменения температурного распределения на стадии охлаждения основной проблемой является определение значения нелинейного коэффициента теплоотдачи с поверхности заготовки. В работе используется нелинейный эквивалентный коэффициент теплоотдачи, определяющий скорости охлаждения заготовки, найденный для экспериментальной установки спрейерного типа при расходе воды к площади закалки $M = 1.2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ [35, 99]. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры представлена на рисунке 2.7, а. Нелинейный эквивалентный коэффициент теплоотдачи на стадии охлаждения применен при моделировании охлаждения поверхностей, показанных на рисунке 2.7, б.



а)



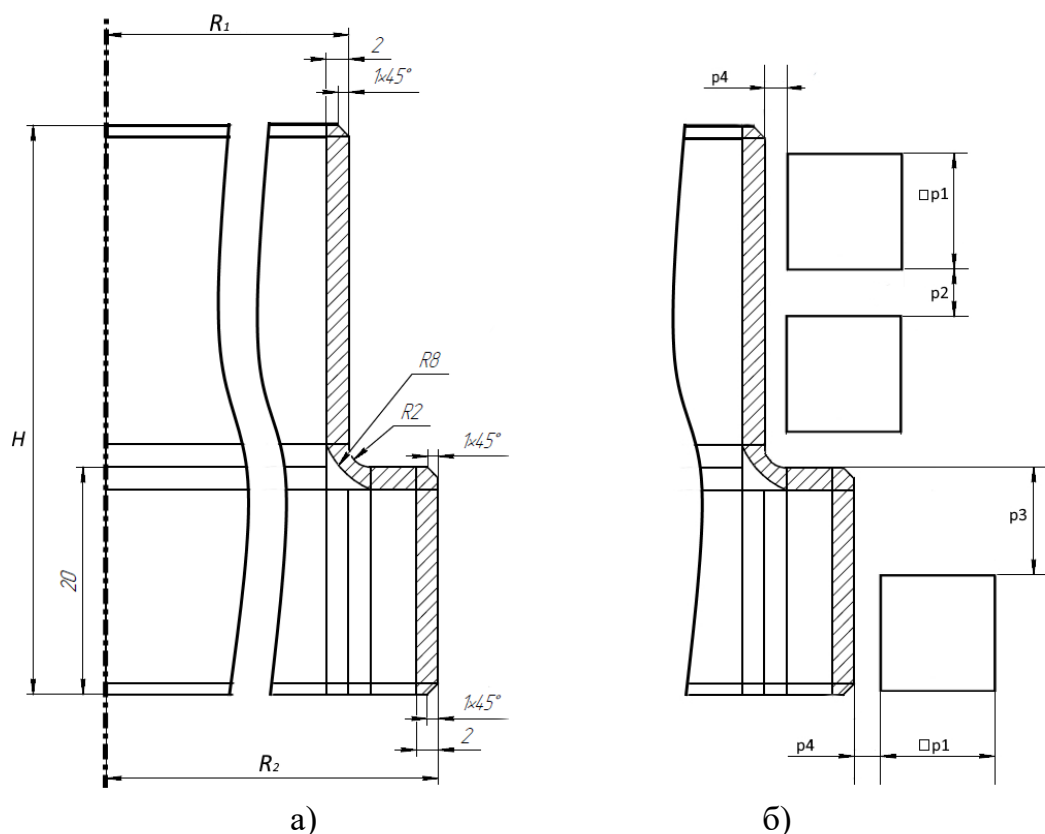
б)

а – нелинейная расчетная зависимость коэффициентов теплоотдачи от температуры;

б – схема спрейерной системы охлаждения поверхности металла с водой

Рисунок 2.7 – Характеристики системы охлаждения

После задания свойств материалов строится двумерная осесимметричная геометрия индукционной нагревательной системы. Геометрия системы включает заготовку сложной геометрической формы с прямоугольным выступом, трехвитковый индуктор и прилегающее воздушное пространство, размеры которого заданы таким образом, что его дальнейшее увеличение не меняет результаты расчета температурного поля. Исследуемая в работе осесимметричная заготовка длиной H , радиусами R_1 и R_2 располагается так, чтобы вертикальная ось OY являлась осью симметрии. Это значительно упрощает процесс моделирования в программном пакете ANSYS Mechanical APDL за счет уменьшения количества узлов сетки и конечных элементов, влияющих на скорость расчета. На рисунке 2.8 представлено схематичное изображение геометрии заготовки сложной формы, выполненной из типовой конструкционной низкоуглеродистой стали марки 40, и витков индуктора прямоугольной формы, а также штриховкой показан поверхностный закаливаемый слой.



а – общий вид заготовки; б – заготовка и витки индуктора прямоугольной формы

Рисунок 2.8 – Геометрия типовой системы нагрева

Исходные данные для моделирования процесса поверхностной закалки детали сложной формы в индукторе с типовой прямоугольной формой витков представлены в таблицах 2.4 и 2.5 [26].

При высокоскоростном индукционном нагреве важно учитывать нижнюю границу по температуре, при которой начинается аустенитное превращение. Для гарантированного превращения технологическое ограничение по минимальной температуре нагрева необходимо принимать с некоторым запасом.

Применение низкоуглеродистых сталей широко распространено и в большинстве случаев именно из них изготавливают втулки, редукторы, зубчатые колёса и валы-шестерни, цепные приводные звёздочки, кулачки, суппорта, шпиндели и прочие детали, подвергающиеся в процессе эксплуатации нагрузкам и трению. В отличие от легированных сталей их стоимость ниже и для них проще выполнять термическую обработку. На рис. 2.9 показана диаграмма, на которой изображено формирование различных микроструктур в зависимости от изменения температуры, времени нагрева и свойств низкоуглеродистой стали марки 45, которая практически аналогична свойствам стали марки 40 [120].

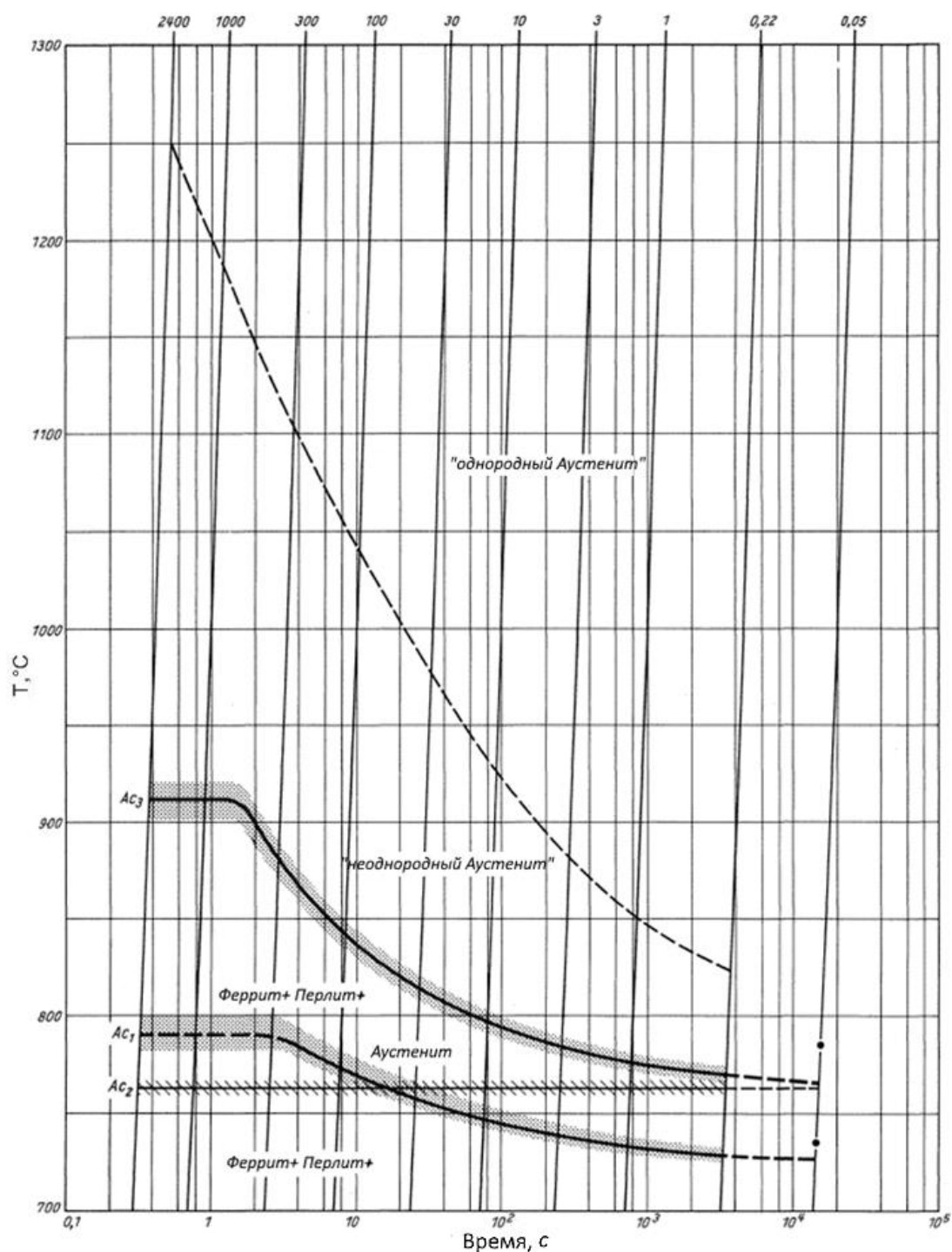


Рисунок 2.9 – Диаграмма формирования различных микроструктур в зависимости от температуры и времени нагрева для стали С45 [120]

Таблица 2.4 – Исходные данные для моделирования стадии нагрева [26]

| № | Наименование параметра | Значение |
|----|--|----------|
| 1. | Начальная температура заготовки, T_0 , °C | 20 |
| 2. | Длительность стадии индукционного нагрева, τ^0 , с | 10 |
| 3. | Требуемая температура нагрева вдоль границы закаливаемого слоя, T^* , °C | 900 |
| 4. | Высота заготовки, H , мм | 50 |
| 5. | Длина границы закаливаемого слоя стальной заготовки, мм | 55.8 |

| | | |
|-----|--|----------|
| 6. | Радиус заготовки, $R1$, мм | 40 |
| 7. | Радиус заготовки, $R2$, мм | 48 |
| 8. | Глубина поверхностного закаливаемого слоя, C , мм (за исключением угловых зон) | 2 |
| 9. | Типовая углеродистая сталь, (марка) | Сталь 40 |
| 11. | Частота тока индуктора, кГц | 50 |
| 12. | Шаг расчета модели, с | 0,2 |
| 13. | Сторона витка индуктора ($p1$), мм | 12 |
| 14. | Расстояние между витком №1 и №2 ($p2$), мм | 2 |
| 15. | Расстояние между горизонтальной поверхностью выступа и витком №3 ($p3$), мм | 8,17 |
| 16. | Расстояние между витком и заготовкой ($p4$), мм | 2 |
| 17. | Сила тока витка №1,3 А | 1432 |
| 18. | Сила тока витка №2, А | 1832 |

Таблица 2.5 – Исходные данные для моделирования стадии охлаждения [26]

| № | Наименование параметра | Значение |
|----|---|----------|
| 1. | Длительность стадии охлаждения, τ^0 , с | 5 |
| 2. | Шаг расчета модели, с | 0,05 |
| 3. | Требуемая температура детали вдоль границы закаливаемого слоя для мартенситного превращения, T^* , °С | Ниже 350 |
| 4. | Критическая скорость охлаждения для стали 40, °С/с (рис. 2.2) | ≈520 |

После задания исходных данных подбираются типы конечного элемента, которые необходимы для расчета соответствующих краевых задач анализа. Типы конечных элементов и их свойства, присваиваются соответствующим областям модели. В общем случае библиотека элементов ANSYS содержит более 150 различных типов элементов. Каждый тип элемента имеет уникальный номер и имя, которые идентифицируют категорию элемента, например: BEAM4, PLANE223, SOLID96, и др [100]. Тип элемента дополнительно определяет:

- Набор степеней свободы (который в свою очередь определяет тип анализа – структурный, тепловой, магнитный, электрический, и так далее);
- Размерность пространства для анализа.

Для моделирования стадии нагрева, которая включает взаимосвязанный расчет электромагнитной, тепловой и упругопластической задач разработаны специальные

типы конечных элементов: PLANE13, PLANE55, и PLANE182, соответственно, а для стадии охлаждения: PLANE55, и PLANE182 [100].

Конечные элементы типа PLANE13 применяются для расчета взаимосвязанных двумерных магнитных, тепловых, электрических и структурных полей. Конечный элемент определяется четырьмя узлами с четырьмя степенями свободы (рис. 2.10). Элемент PLANE13 обладает возможностями для моделирования кривых ВН или кривых размагничивания постоянного магнита, а также обладает большим потенциалом жесткости при изгибе и напряжении. При использовании исключительно в структурных расчетах PLANE13 также имеет большие возможности моделирования деформации.



Рисунок 2.10 – Схематичное изображение конечного элемента типа PLANE13

Конечный элемент типа PLANE55 (рис. 2.11) можно использовать в качестве плоского элемента или осесимметричного кольцевого элемента с возможностью моделирования двумерных процессов теплопроводности. Элемент имеет четыре узла с одной степенью свободы, температурой, в каждом узле. Элемент применим для двумерного, стационарного или переходного теплового анализа. При его использовании имеется возможность моделировать компенсацию массообменного теплового потока из поля постоянной скорости [100].

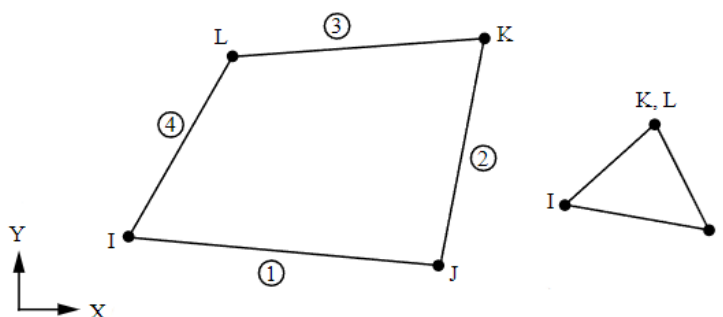


Рисунок 2.11 – Схематичное изображение конечного элемента типа PLANE55

Элемент типа PLANE182 (ранее PLANE42) используется для моделирования двумерных твердых структур. Такой тип элементов может использоваться либо в качестве плоских элементов (для моделирования плоского напряжения, плоской

деформации или обобщенной плоской деформации), либо в качестве осесимметричных элементов, в том числе для моделирования кручения. В большинстве случаев элемент определяется четырьмя узлами с двумя степенями свободы в каждом узле: перемещения в узловых направлениях X и Y . Для осесимметричного варианта с кручением он по-прежнему определяется четырьмя узлами, но с тремя степенями свободы в каждом узле: перемещения в узловых направлениях X и Y и поворот в узловом направлении Y . Элемент используется для моделирования пластичности, гиперупругости, жесткости при напряжении, больших прогибов и процессов сопровождающихся значительными деформациями (рис. 2.12). Он может быть использован одновременно для моделирования деформаций почти несжимаемых упругопластических материалов и полностью несжимаемых гиперупругих материалов [100].

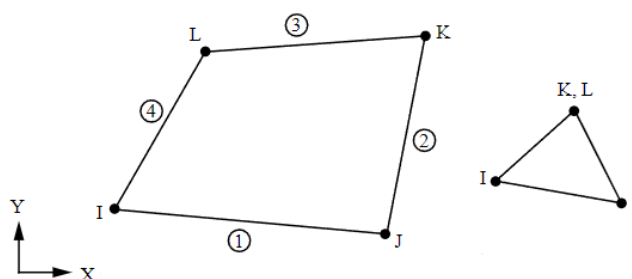


Рисунок 2.12 – Схематичное изображение конечного элемента типа PLANE182

После задания свойств материалов и определения типов конечных элементов для областей, на эти области геометрии необходимо наложить либо четырехугольную узловую сетку, либо, если это невозможно, свободную триангулярную. Все линии геометрии объектов делятся на определенное число элементов, которое варьируется для достижения баланса между необходимой степенью точности результатов и затраченного времени на расчет. В областях, где требуется получить максимальную степень точности расчетов, число элементов увеличено, и сетка в таких местах становится более мелкой, и наоборот. Помимо определения количества элементов настраивается их равномерность распределения на одной линии с помощью коэффициента масштабирования. Далее производится оценка качества произведенного сеточного разбиения.

Закаливаемый слой и его приграничные регионы представляют собой область с самым большим числом узлов и элементов. На рисунке 2.13 изображена система «индуктор-заготовка», построенная в ANSYS Mechanical APDL с наложенной конечно-элементной сеткой [26].



Рисунок 2.13 – Двумерная осесимметричная модель системы «индуктор – заготовка» с наложенной конечно-элементной сеткой в ППП ANSYS Mechanical APDL [26]

По завершении этапов определения свойств материалов, создания геометрии, наложения КЭ-сетки, выполняется переход к заданию краевых условий и непосредственному расчету.

Начальные условия позволяют рассчитать значения параметров в каждом узле конечно-элементной сетки в нулевой момент времени, на основе чего происходит вычисление характеристик электромагнитного поля [20]. Граничные условия определяют потери на конвекцию и излучение.

Описываемая модель процесса закалки, написанная на языке программирования APDL, состоит из отдельных файлов, содержащих данные о построении геометрии, наложении сетки, свойств и т.д, и объединенных связующим главным файлом со сценарием расчета, запуск которого может осуществляется при помощи графического интерфейса ANSYS Mechanical APDL (рис. 2.14) [100].

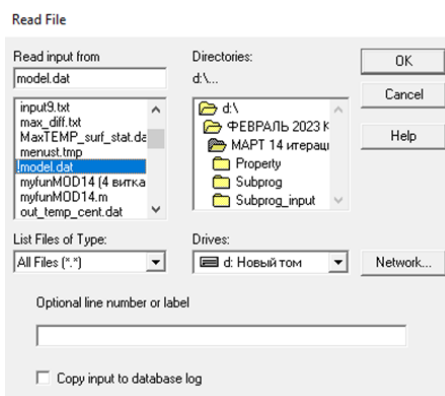


Рисунок 2.14 – Окно запуска расчета модели в ANSYS Mechanical APDL [100]

В ходе расчета сначала определяются значения магнитного векторного и скалярного электрического потенциалов, после чего осуществляется расчет количества

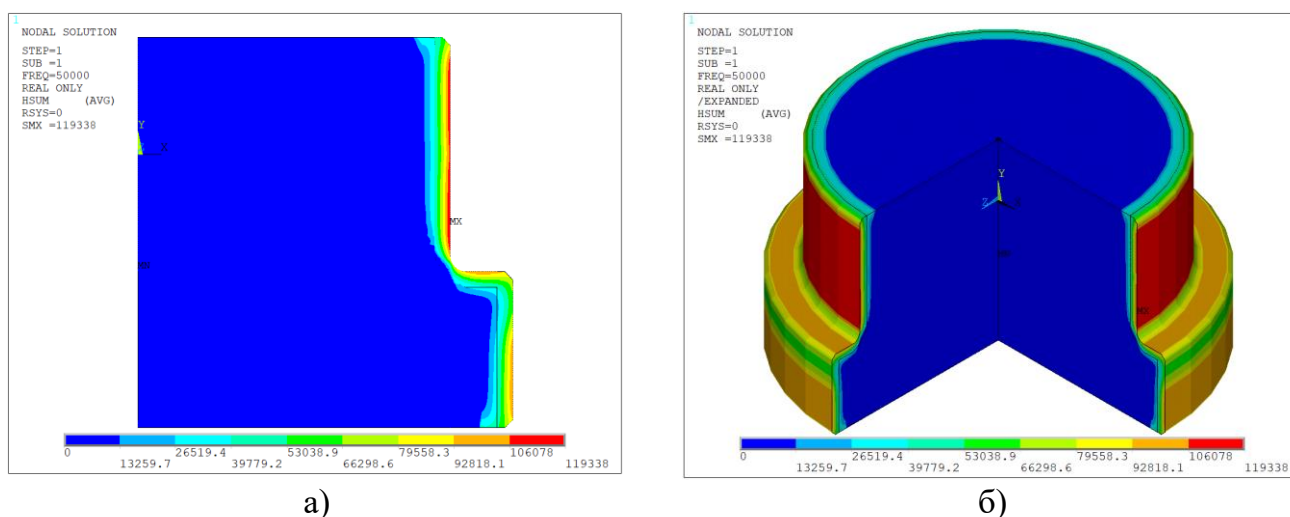
тепла по закону Джоуля-Ленца, который необходим для расчета тепловых полей [100, 113].

2.2.2 Результаты решения электромагнитной задачи

С помощью специальных команд программного кода и графического интерфейса выведены результаты решения электромагнитной задачи: напряженность магнитного поля (HSUM), магнитная индукция (BSUM), распределение Джоулевой теплоты (JHEA), распределение плотности тока (JTSUM), магнитно-векторный потенциал (AZ) для промежуточного анализа. На рисунках (2.15) – (2.17) представлены результаты расчета электромагнитной задачи.

Анализ результатов моделирования электромагнитных полей показал, что напряженность магнитного поля сконцентрирована на поверхности заготовки, преимущественно в слое, равном глубине проникновения тока в металл. При этом во всем остальном объеме заготовки напряженность стремится к нулю. В угловой зоне заготовки наблюдается заметное снижение мощности и глубины проникновения магнитного поля по сравнению с вертикальными участками поверхностного слоя.

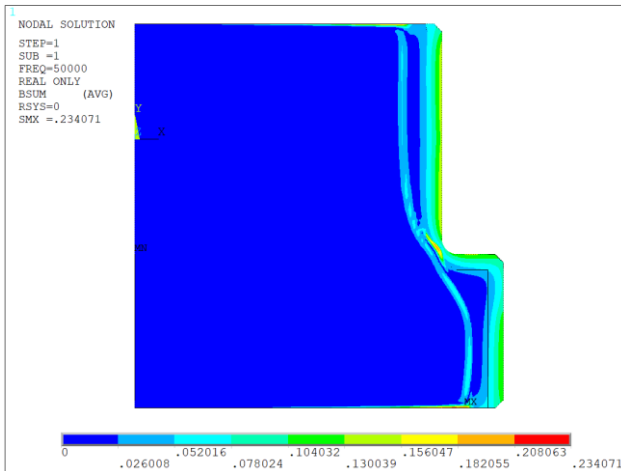
Все результаты, которые показаны далее, выполнены в двумерном и в трехмерном пространствах. Трехмерные распределения получены путем разворачивания двумерной модели в ANSYS Mechanical APDL.



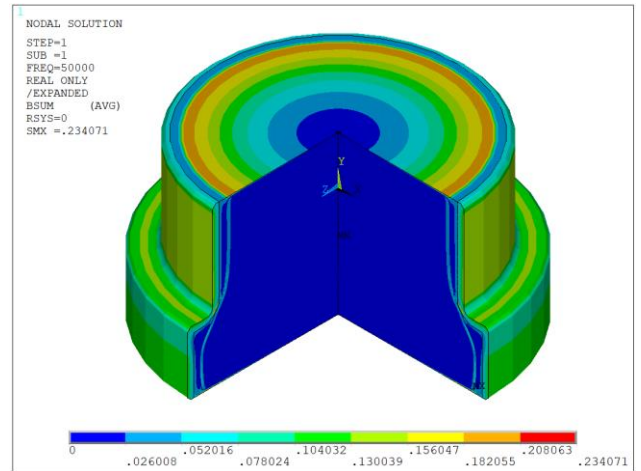
а – двумерное распределение; б – трехмерное распределение

Рисунок 2.15 – Напряженность магнитного поля (HSUM) в конечный момент времени нагрева

Распределение магнитной индукции, представленное на рисунке 2.16, показывает, что максимальное значение магнитной индукции в поверхностных слоях заготовки в конце стадии нагрева составляет около 0.23 Тл.



а)

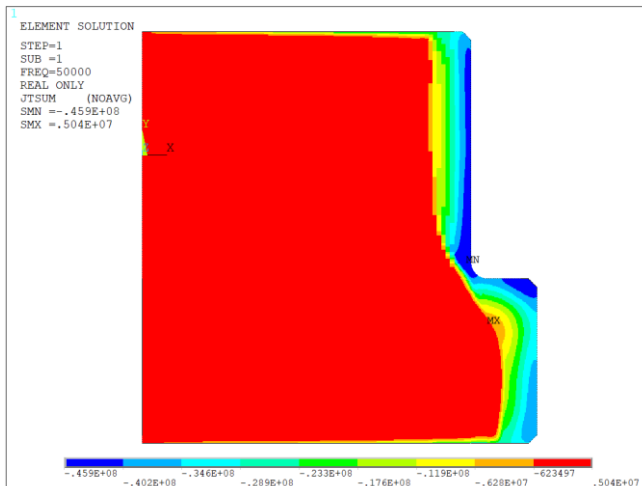


б)

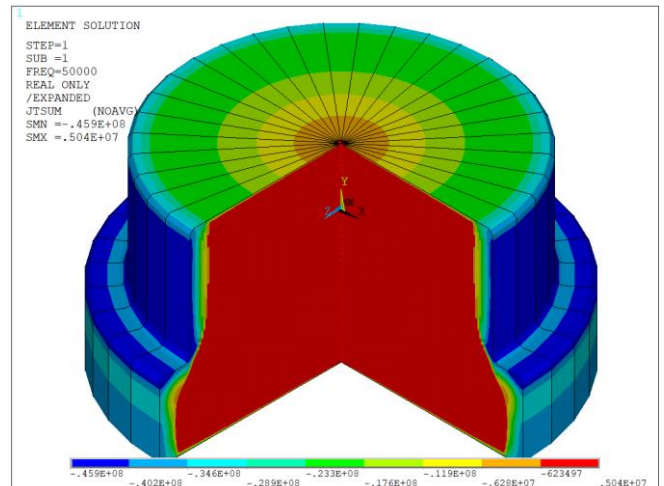
а – двумерное распределение; б – трехмерное распределение

Рисунок 2.16 – Магнитная индукция (BSUM) в конечный момент времени нагрева

Распределение плотности тока на поверхности заготовки является неоднородным, поскольку глубина проникновения вблизи угловой зоны значительно ниже, чем на вертикальных участках поверхностного слоя. Наибольшее значение плотности тока в конечный момент времени нагрева составило $0.46 \cdot 10^8$ А/м² (рис. 2.17).



а)

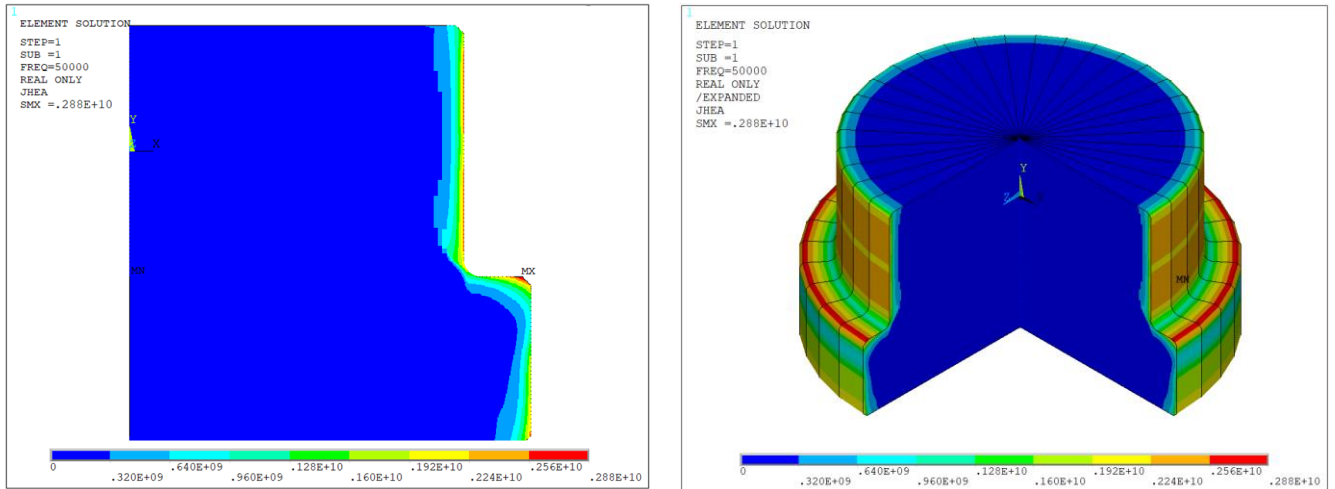


б)

а – двумерное распределение; б – трехмерное распределение

Рисунок 2.17 – Распределение плотности тока (JTSUM) по заготовке в конечный момент времени нагрева

Результаты моделирования показывают, что максимальное количество Джоулевой теплоты (рис. 2.18), которое выделяется на поверхности заготовки в конце стадии нагрева, составляет $0,288e+10$ Вт.



а)

б)

а – двумерное распределение; б – трехмерное распределение

Рисунок 2.18 – Распределение мощности внутренних источников теплоты (JHEA) в конечный момент времени нагрева

Распределение магнитно-векторного потенциала (AZ) в конечный момент времени нагрева представлено на рисунке 2.19.

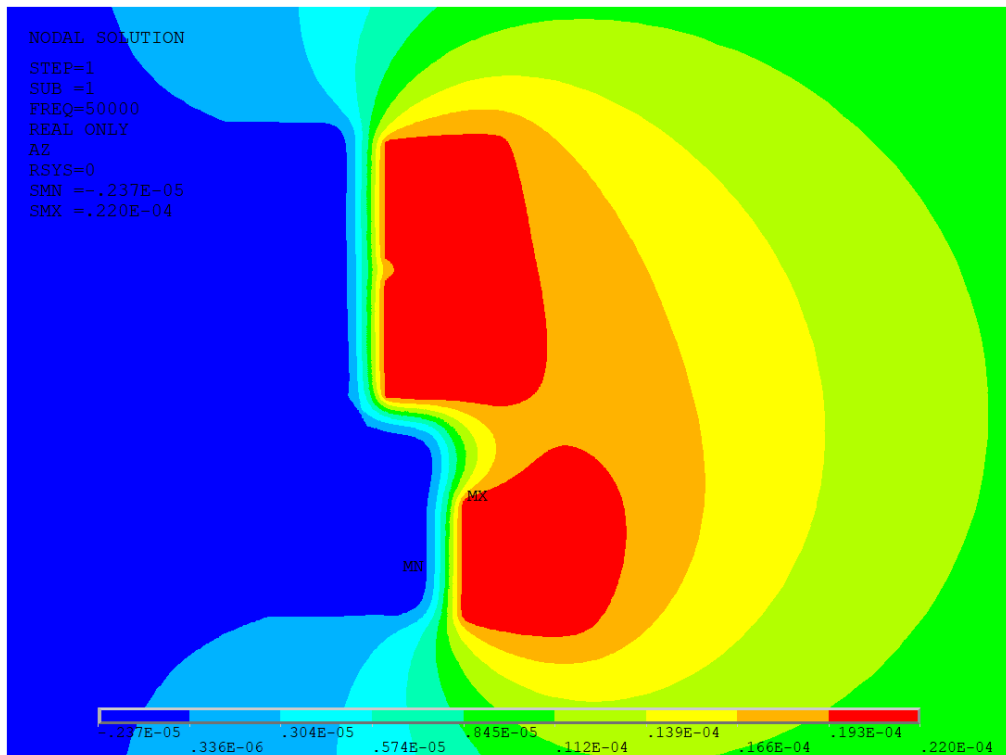


Рисунок 2.19 – Распределение магнитно-векторного потенциала (AZ) в конечный момент времени нагрева

Анализ результатов численного моделирования процесса индукционного нагрева заготовки сложной формы с витками квадратного сечения показал, что сильное влияние на снижение равномерности электромагнитного поля оказывает наличие угловых зон, что соответственно влияет на снижение равномерности температурного поля вдоль границы закаливаемого слоя, как следует из анализа результатов тепловой задачи, представленного далее.

2.2.3 Результаты решения тепловой задачи

Согласно представленной в разделе 2.2 последовательности решения задач моделирования, после решения электромагнитной задачи на каждом шаге расчета модели выполняется переход к решению тепловой задачи, в которой в качестве исходных данных используются результаты расчета электромагнитной задачи. В свою очередь, на каждом шаге итерационного процесса расчета электромагнитного поля полученное в результате решения тепловой задачи температурное поле используется в качестве исходных данных. При расчете температурных полей учитываются потери на конвекцию и излучение с поверхности металлической заготовки, которые задаются с помощью соответствующих граничных условий. В таблице 2.6 приведены коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена, применяемые для численного моделирования стадии нагрева.

Таблица 2.6 – Значения коэффициентов теплообмена с поверхности для тепловой задачи

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м ² °С ⁴ | 0.85 |
| Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м ² °С | 5 |

Согласно данным, полученным в ходе расчета электромагнитной задачи при типовой прямоугольной форме витков индуктора, количество выделяемой Джоулевой теплоты в угловой зоне заготовки значительно ниже, чем в вертикальных зонах поверхностного слоя и, напротив, в зоне выступа электромагнитные источники тепла имеют наибольшую интенсивность, что приводит к формированию значительной неравномерности температурного поля (рис. 2.20).

Варьирование в широком диапазоне различных исследуемых параметров, в том числе размеров витков, расстояний между индуктором и заготовкой, расстояний между

витками, токов на витках катушки индуктора, позволило снизить температурное отклонение приблизительно до $\pm 200^\circ\text{C}$ (рис. 2.20), однако, полученный результат также совершенно не удовлетворяет технологическим требованиям, предъявляемым к исследуемому процессу. В частности, температура в отдельных точках упрочняемого слоя оказывается ниже минимально допустимой температуры нагрева, при которой происходит начало аустенитного превращения микроструктуры (рис 2.9).

Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя заготовки в конце стадии индукционного нагрева представлено на рис. 2.20 [26].

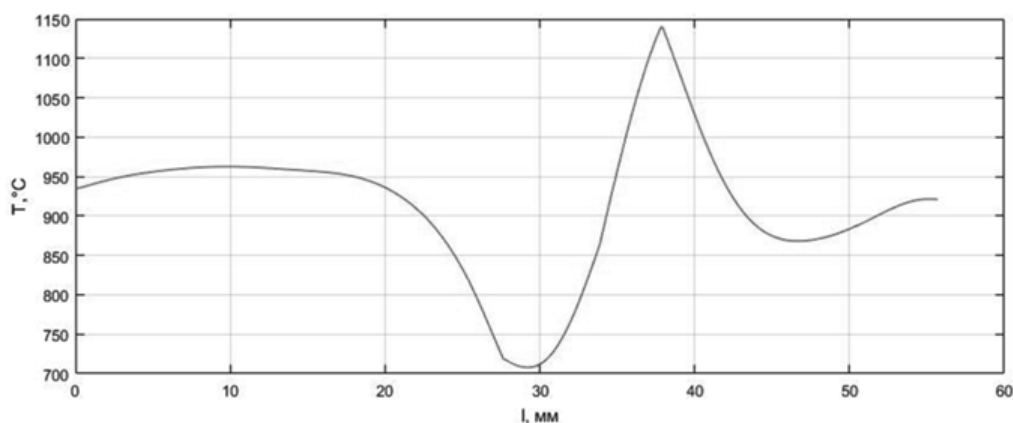
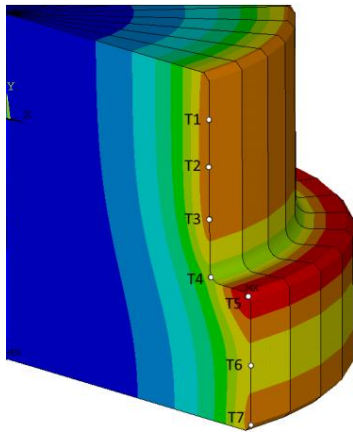


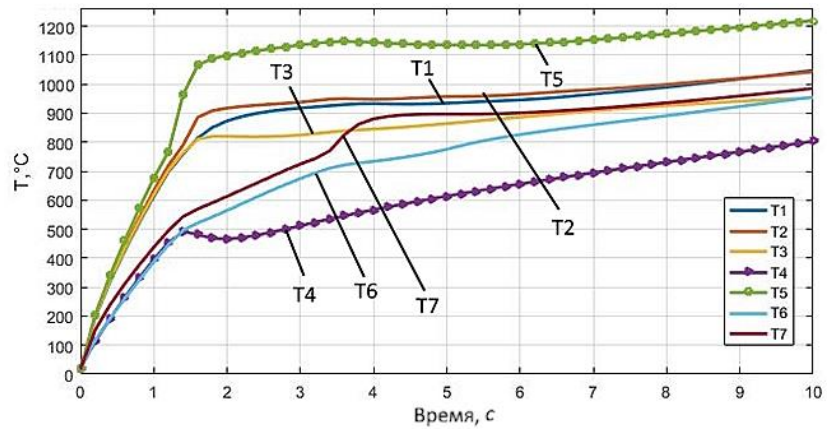
Рисунок 2.20 – Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя заготовки в конце стадии нагрева в индукторе с прямоугольной формой витков [26]

Таким образом, результаты моделирования приводят к выводам, что квадратная форма геометрии витков, представленная на рисунке 2.8, не дает возможности обеспечить требуемую равномерность нагрева закаливаемого поверхностного слоя стальной заготовки сложной формы. Поэтому предлагается перейти к более сложной геометрической форме витка 2 индуктора с выступающей внешней частью для уменьшения резкого отклонения температуры в угловой зоне заготовки [26, 27].

Для исследования изменения температурного поля в процессе нагрева по объему заготовки были выбраны 18 характерных точек, 3 из которых расположены вдоль оси симметрии в центре заготовки, 8 – вдоль границы закаливаемого слоя и 7 – на поверхности заготовки. Результаты расчета изменения температуры во времени в характерных точках и расположение этих точек представлены на рисунках 2.21 и 2.22.



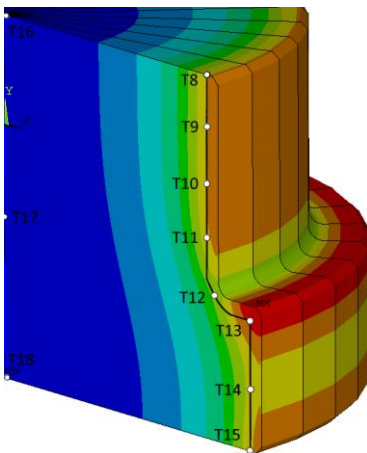
а)



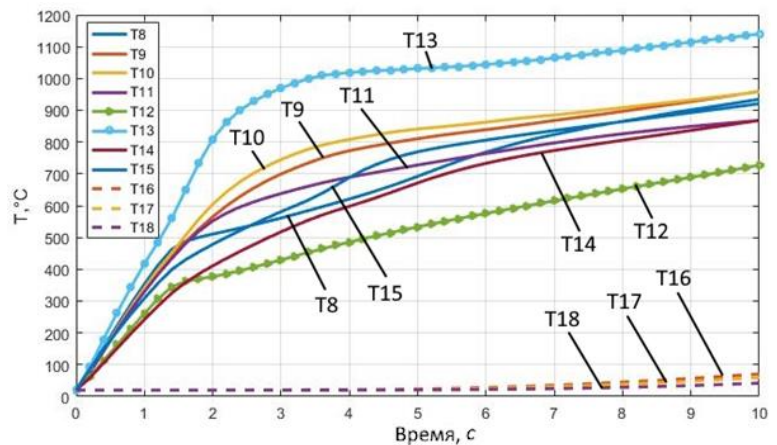
б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени в точках на поверхности заготовки

Рисунок 2.21 – Температуры в точках Т1-Т7 вдоль границы закаливаемого слоя [26]



а)



б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки

Рисунок 2.22 – Температуры в точках Т8-Т18 вдоль границы закаливаемого слоя и в центре заготовки в процессе нагрева [26]

Как следует из приведенных на рис. 2.21 результатов расчета температура в точке Т5, находящейся на поверхности выступа заготовки, через 1.5 секунды после начала нагрева превысила установленное значение технологического ограничения $T_{\text{доп}}=1050^{\circ}\text{C}$, а в конце стадии нагрева достигла 1200°C . В то же время в точке Т4, находящейся в угловой зоне, на всем протяжении нагрева наблюдается температура ниже границы начала аустенитного превращения АС3, при которой, согласно диаграмме, представленной на рисунке 2.9, не сформируется аустенитная микроструктура при высокоскоростном индукционном нагреве. Общий вид температурного распределения по объему заготовки в конце стадии нагрева представлен на рисунке 2.23.

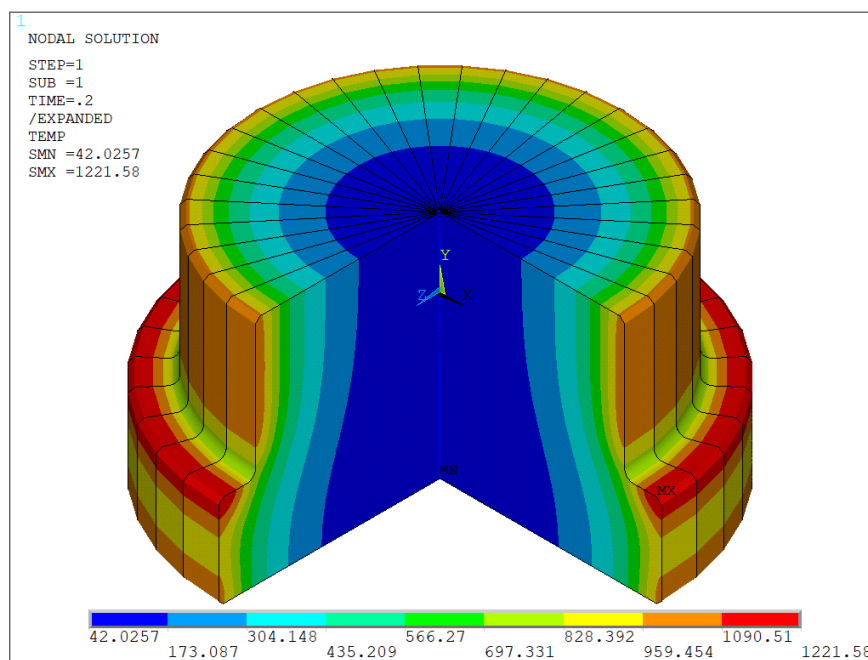
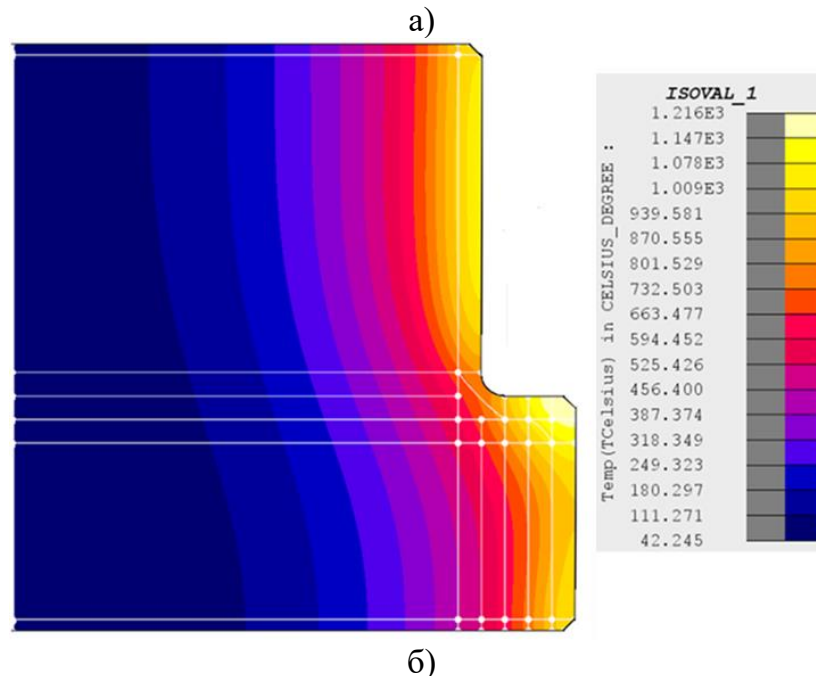
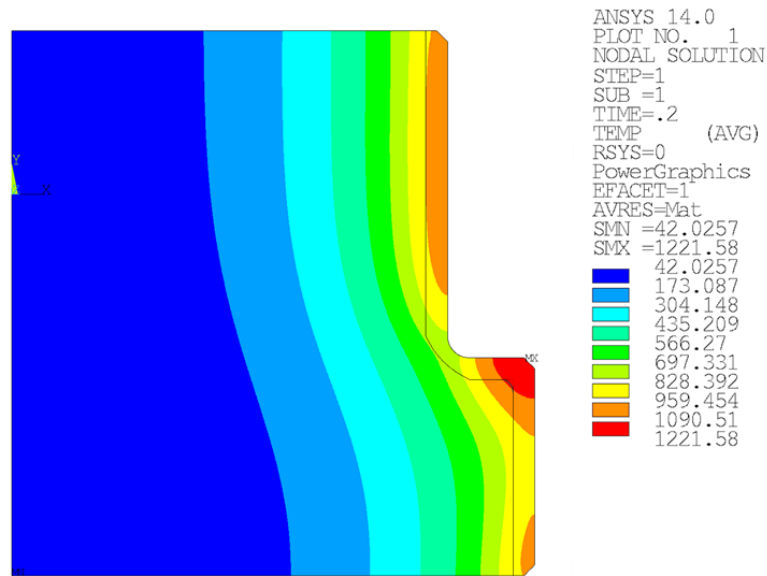


Рисунок 2.23 – Температурное распределение по объему стальной заготовки в конечный момент времени нагрева

Превышение допустимой температуры в процессе нагрева подтверждает необходимость учета технологических ограничений на максимальные температуры при формулировке задачи оптимизации конструкции индуктора и алгоритмов управления процессами индукционного нагрева.

Расчет тепловых полей для дальнейших исследований требует подтверждения корректности результата, полученного при моделировании поверхностного индукционного нагрева. Для этого выполнена верификация численной модели процессов на стадии индукционного нагрева путем сопоставления результатов моделирования температурных полей в конце стадии нагрева в индукторе с типовой прямоугольной формой витков, полученных в программных пакетах ANSYS Mechanical APDL и Altair FLUX. В свою очередь, для проверки корректности результатов моделирования в программном пакете Altair FLUX на соответствие известным физическим закономерностям была проведена валидация разработанной модели на основе сравнения с результатами физического эксперимента на существующей лабораторной нагревательной установке, которая была сконструирована в Институте электротехнологий Университета имени Лейбница (г. Ганновер, Германия) [20].

На рисунке 2.24 представлены температурные распределения, полученные по продольному сечению заготовки в конце стадии нагрева в индукторе с типовой прямоугольной формой витков.



а – в ANSYS Mechanical APDL; б – в Altair FLUX

Рисунок 2.24 – Температурное распределение в продольном сечении заготовки в конечный момент времени нагрева

На рисунке 2.25 представлено сравнение температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева, полученных в программных пакетах ANSYS Mechanical APDL и Altair FLUX для данных, представленных в таблицах 2.4, 2.6. Проведенный анализ сравнения позволяет сделать заключение о достоверности и удовлетворительной точности результатов моделирования основных физических закономерностей поведения температурных и электромагнитных полей на этапе нагрева. Это обеспечивает возможность использования данной модели в оптимизационных процедурах и инженерных расчетах.

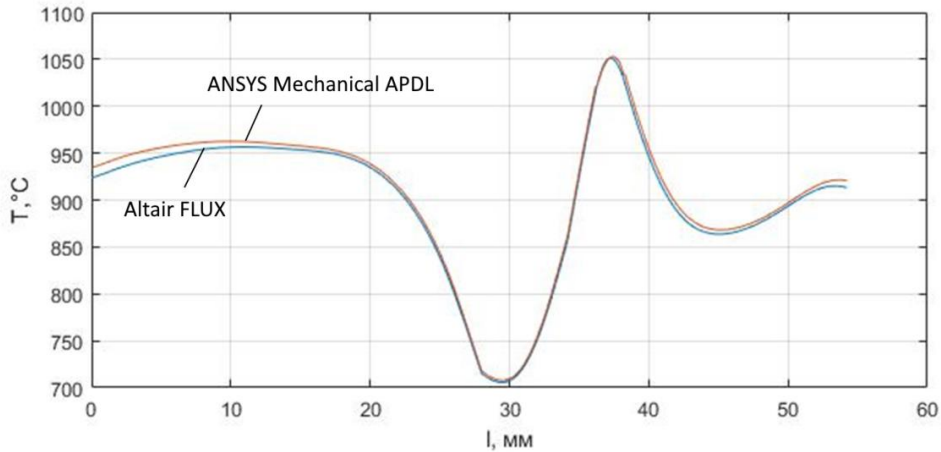


Рисунок 2.25 – Сравнение температурных распределений в конце стадии нагрева вдоль границы закаливаемого слоя, полученных в пакетах для численного моделирования ANSYS и FLUX

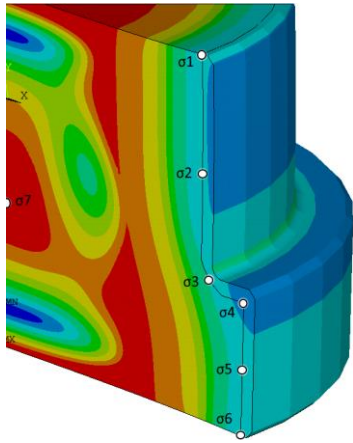
2.2.4 Результаты решения упругопластической задачи

Исследование стадии индукционного нагрева сопровождается анализом полей термических напряжений, теория которой в общем виде описана в разделе 2.2. Нагрев поверхностного слоя приводит к возникновению временных растягивающих и сжимающих напряжений. Для определения эквивалентных напряжений применяется критерий наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения, который хорошо согласуется с опытами для изотропных материалов [26]. Уравнение пластичности Губера-Мизеса в общем виде:

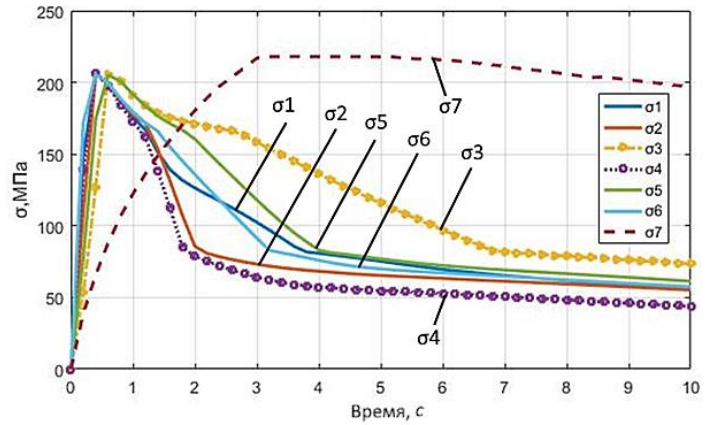
$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_T$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - оси главных напряжений, σ_T - предел текучести материала, σ_i - эквивалентные напряжения материала.

С точки зрения механики деформируемого твердого тела в задаче реализуется плоско-деформируемое состояние детали. Использование теории малых упругопластических деформации позволяет рассмотреть билинейную модель пластичности с изотропным упрочнением с независимыми от температуры параметрами (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) [19]. Расположение характерных точек вдоль границы закаливаемого слоя и зависимости эквивалентных напряжений по Мизесу от времени на стадии нагрева показано на рисунке 2.26.



а)



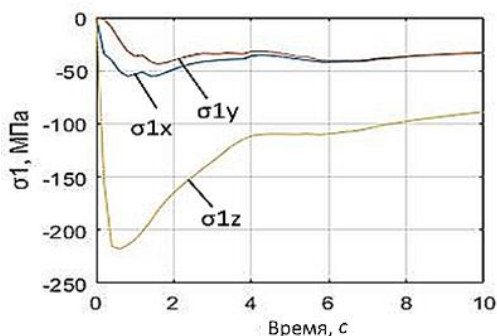
б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость термических напряжений от времени в характерных точках на поверхности заготовки

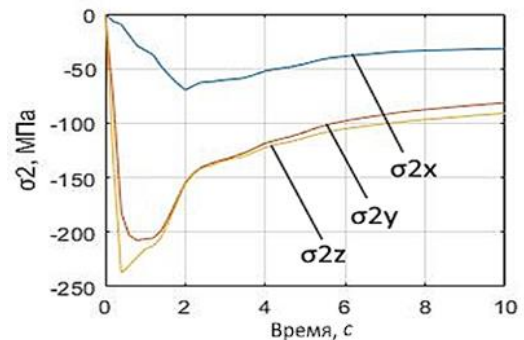
Рисунок 2.26 – Эквивалентные напряжения по Мизесу на стадии нагрева

В начале интенсивного нагрева в поверхностном слое заготовки в точках σ_1 - σ_6 наблюдаются наибольшие значения растягивающих напряжений, которые со временем начинают уменьшаться. Напротив, в центре заготовки в точке σ_7 образуются сжимающие напряжения, которые со временем увеличиваются до значений, сопоставимых с теми, что были в поверхностном слое в начале нагрева [26].

Для детального исследования компонент напряжений по объему заготовки выбраны семь точек, для контроля промежуточных значений напряжений, шесть из которых расположены вблизи поверхности на границе закаливаемого слоя заготовки и одна – в центре. Значения напряжений в характерных точках на каждом временном шаге расчета записывались в текстовый файл [26]. На рисунках 2.27, а-ж представлены изменения напряжений заготовки по осям x, y, z во времени. В большинстве точек осевая и окружная компоненты термических напряжений вдоль поверхности пересекают ось абсцисс и обращаются в ноль, а эквивалентное термонапряжение становится равным радиальной составляющей, значение которой близко к нулю.



а)



б)

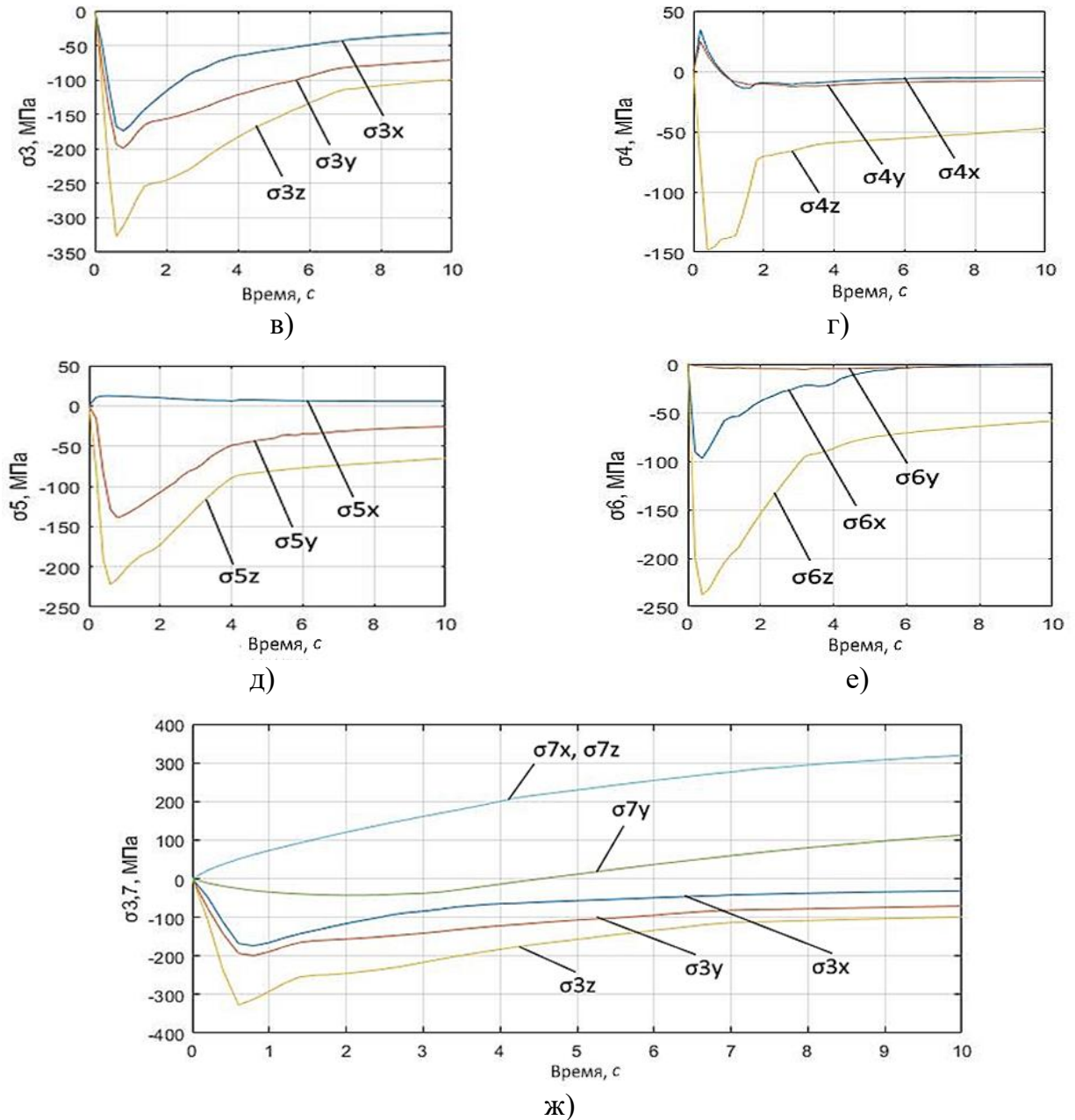
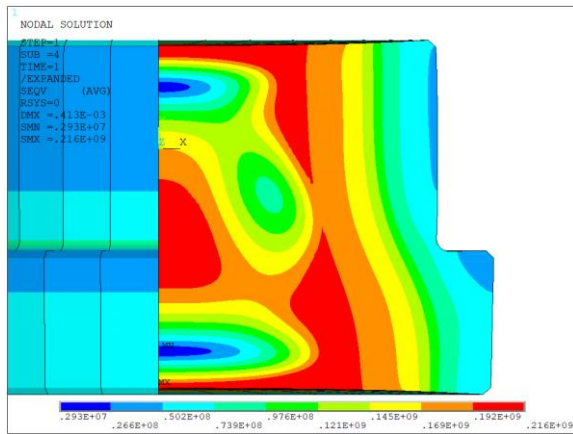
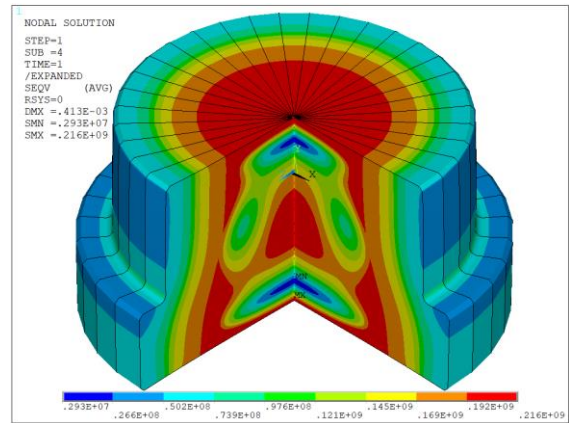


Рисунок 2.27 – Осьевые компоненты напряжений в точках $\sigma_1 - \sigma_7$ (а-ж) в процессе поверхностного индукционного нагрева

Результаты расчета модели показывают, что в процессе нагрева практически достигается предел текучести в точках σ_3 и σ_7 , значение которого по ГОСТ 1050-2013 [121] не менее 335 МПа, но максимальное значение термонапряжений на всем протяжении нагрева не превышает предела прочности для данного материала, который составляет не менее 570 МПа [26]. На рисунке 2.28 представлено распределение напряжений по Мизесу по объему заготовки в конечный момент времени нагрева.



а)



б)

а – двумерное распределение; б – трехмерное распределение

Рисунок 2.28 – Распределение напряжений по Мизесу в конечный момент времени нагрева

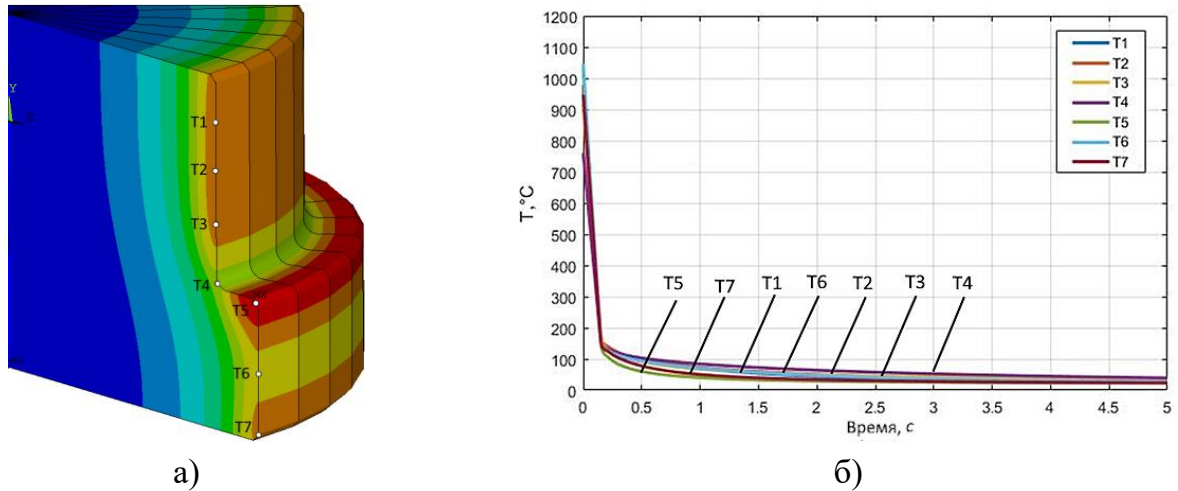
Таким образом, анализ результатов моделирования в узловых точках и по всему объему заготовки подтверждает необходимость решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров нагревателя и режимов его функционирования с учетом фазовых ограничений на максимальную допустимую температуру и термические напряжения, которая является центральной в диссертационном исследовании.

2.2.5 Результаты моделирования процесса охлаждения

Для оценки температур и термических напряжений при поверхностной закалке моделируется стадия охлаждения. В процессе закалки важно обеспечить высокую скорость охлаждения заготовки не ниже критической, т.к. в интервале температур перлитного превращения до температур минимальной устойчивости переохлажденного аустенита углеродистых и низколегированных сталей (500-550°C) необходимо предотвратить перлитный распад аустенита и охладить заготовку до температур ниже 500°C, согласно диаграмме (рис.2.2), где устойчивость аустенита возрастает и замедление охлаждения уже не опасно [26]. В противном случае аустенит будет претерпевать перлитное превращение и качество закалки снизится [26].

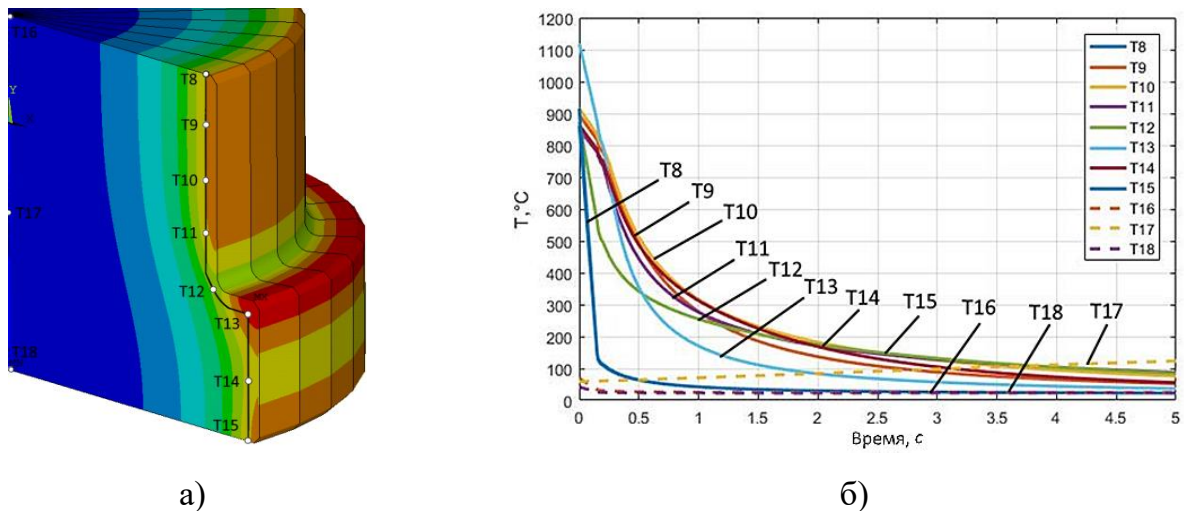
Изменения температур во времени в характерных точках на стадии охлаждения представлены на рисунках 2.29 и 2.30. В начале стадии охлаждения температурный перепад между поверхностью и центром имеет наибольшее значение, а затем

наблюдается снижение температуры поверхностного слоя заготовки и прогрев за счет теплопроводности центральной части заготовки [26].



а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени в точках на поверхности заготовки

Рисунок 2.29 – Температуры в характерных точках Т1–Т7 на стадии охлаждения



а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки

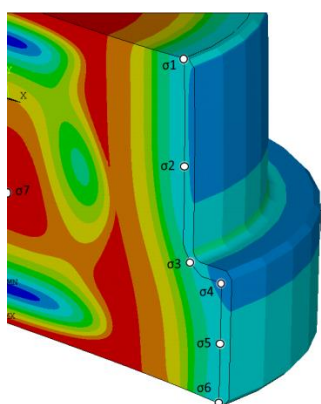
Рисунок 2.30 – Температуры в характерных точках Т8–Т18 на стадии охлаждения [26]

Интервал температур мартенситного превращения напрямую зависит от содержания углерода и других компонентов стали. В большинстве случаев этот диапазон составляет от 350°C до 100°C или от 300°C до 200°C. В этом интервале происходит окончательное превращение аустенита в мартенсит, которое сопровождается возникновением высоких внутренних напряжений и опасностью появления закалочных микротрещин [26]. Установлено, что при очень интенсивном охлаждении сильным водяным душем или быстродвижущимся потоком воды под

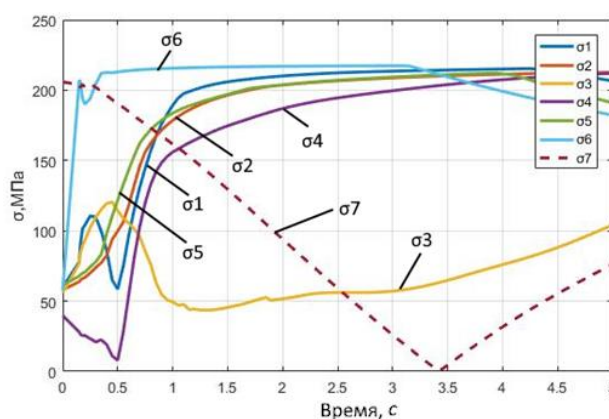
давлением образования трещин также не происходит, что связывают с равномерностью охлаждения различных участков поверхности сложной геометрической формы.

Согласно результатам моделирования стадии охлаждения, при использовании заранее известного нелинейного эквивалентного коэффициента теплоотдачи, наблюдается быстрое снижение температуры в поверхностном слое детали. Сравнение скоростей моделируемого изменения температуры вдоль границы закаливаемого слоя (рис. 2.30) со скоростями охлаждения на диаграмме изотермического превращения аустенита (рис. 2.2) показывает, что скорость охлаждения вдоль границы упрочняемого слоя примерно равна критической, но при этом в угловой области, из-за недостижения температуры аустенизации, на стадии охлаждения не сформируется мартенситная микроструктура.

Аналогичным образом оценка тепловых полей на стадии охлаждения сопровождается анализом термических напряжений. Вследствие высокой пластичности стали при высоких температурах, деформации оказываются упругопластическими и поверхностные слои будут растянутыми по отношению к центральным. Различная скорость охлаждения поверхностных и центральных слоев приводит к неодинаковому тепловому сжатию, а следовательно, к возникновению термических деформаций и напряжений. Поскольку охлаждаемое тело остается сплошным, то на поверхности в конце охлаждения наблюдаются сжимающие напряжения, а в центре – растягивающие. В процессе охлаждения сначала возникают временные, а затем остаточные напряжения, но с противоположным знаком [19, 26, 114]. На рисунке 2.31 представлены результаты расчета термических напряжений по Мизесу в процессе быстрого охлаждения [26].



а)

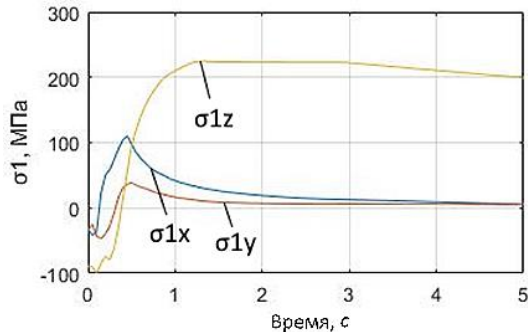


б)

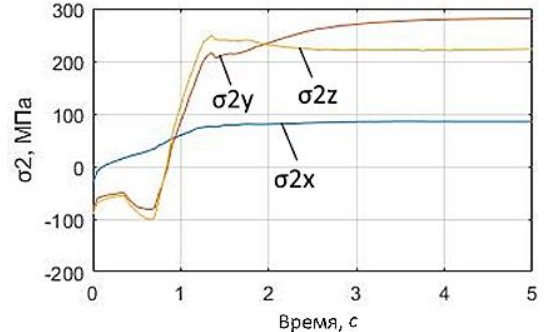
а – расположение характерных точек; б – зависимость термических напряжений в характерных точка вблизи границы закаливаемого слоя

Рисунок 2.31 – Эквивалентные напряжения по Мизесу на стадии охлаждения

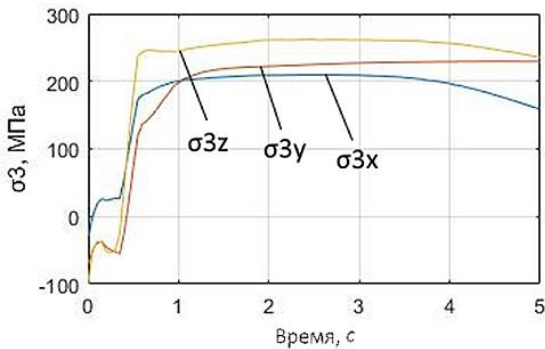
В начале стадии интенсивного охлаждения наибольшие термические напряжения образуются в поверхностных слоях заготовки, а затем их величина постепенно уменьшается. При этом в центре заготовки в процессе охлаждения на оси Y наблюдается повышение температуры за счет теплопроводности от прогретой поверхности и одновременное снижение абсолютных максимальных напряжений, затем все поверхности заготовки охлаждаются до температуры воды и интенсивность теплообмена с поверхности снижается [26]. Происходит перераспределение внутренних напряжений, которые в конце процесса закалки превращаются в остаточные [26]. В представленном расчете максимальное значение термонапряжений не превышает предела прочности стали 40, который составляет не менее 570 МПа, но практически достигнут предел текучести (335 МПа) из-за высокой скорости охлаждения заготовки, что подтверждает необходимость учета технологических ограничений на термонапряжения при формировании алгоритмов управления процессами охлаждения [26]. На рисунке 2.32 представлено изменение компонент напряжений заготовки по осям x, y, z во времени.



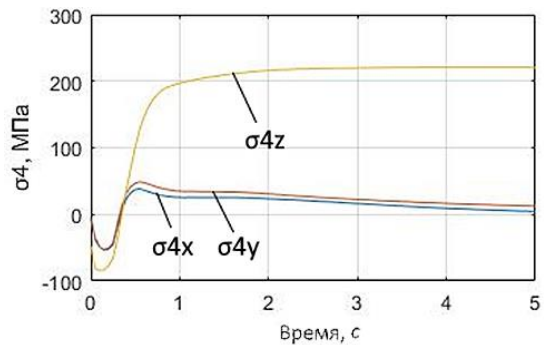
а)



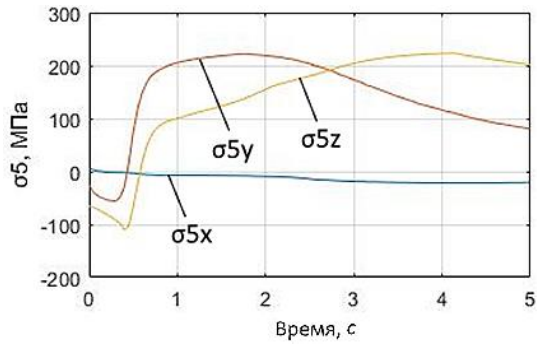
б)



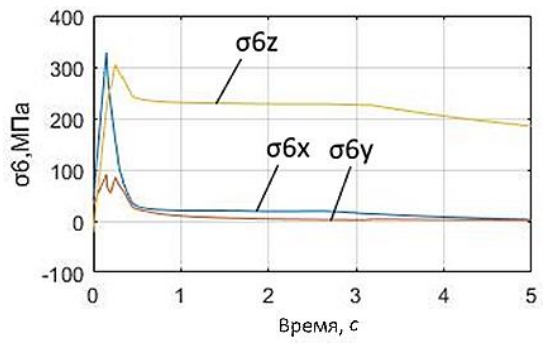
в)



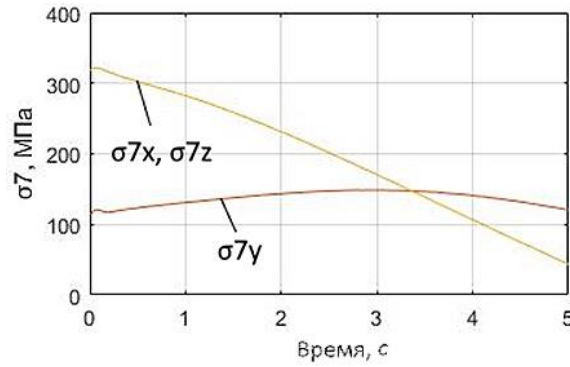
г)



д)



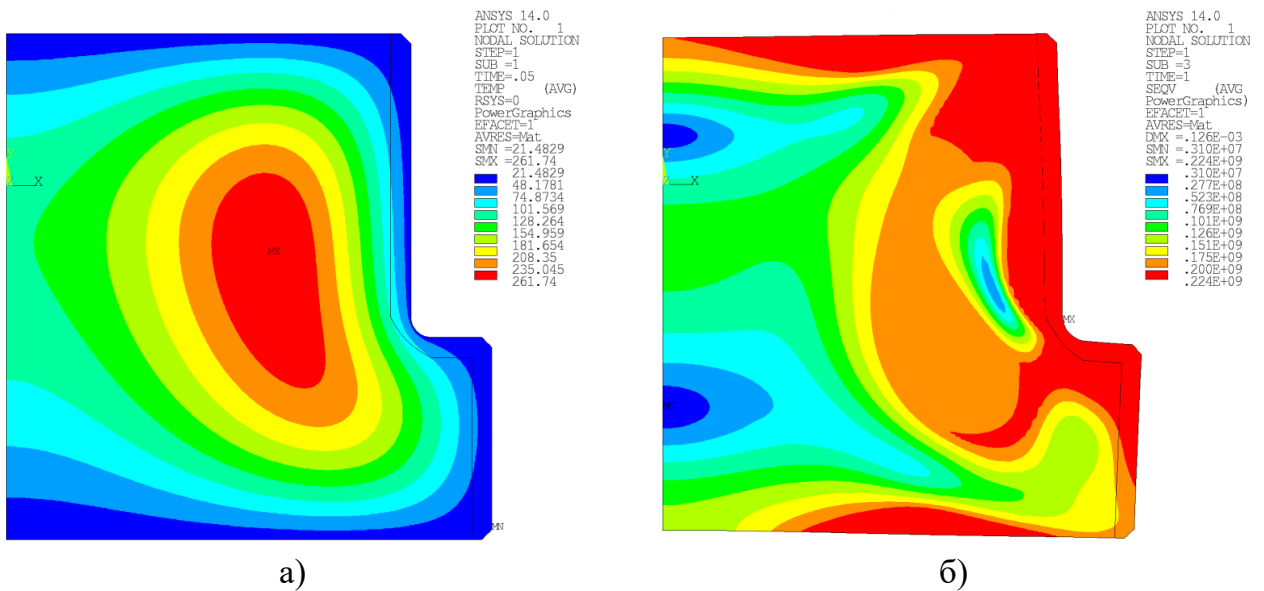
е)



ж)

Рисунок 2.32 – Компоненты напряжений в характерных точках $\sigma_1 - \sigma_7$ (а-ж) по сечению заготовки в процессе нагрева

Температурное поле и поле напряжений по Мизесу по сечению заготовки после 5 секунд охлаждения представлено на рис. 2.33.



а – температурное поле; б – поле напряжений по Мизесу

Рисунок 2.33 – Результат моделирования процесса охлаждения после 5 секунд охлаждения

Подробный анализ результатов моделирования в узловых точках и по всему объему заготовки подтверждает необходимость решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров индукционного нагревателя и режимов его функционирования, которая является центральной в диссертационном исследовании.

2.3 Выводы по второй главе

1. Проанализированы возможности современных программных пакетов для численного моделирования, большинство из которых обладают аналогичными функциональными возможностями, такими как взаимосвязанный мультифизичный анализ, возможность задания нелинейных свойств материалов, взаимосвязанные электромагнитные и тепловые расчеты. Однако, не во всех программных продуктах есть функционал для проведения полноценного прочностного анализа. По этой причине и из-за наличия дополнительных преимуществ, в качестве инструмента численного моделирования в диссертационной работе выбран ППП ANSYS Mechanical APDL.

2. Описан процесс построения проблемно-ориентированной численной нелинейной модели индукционной нагревательной системы в программном пакете ANSYS Mechanical APDL, определена последовательность решения задач моделирования процессов на стадиях нагрева и охлаждения. Представлены нелинейные свойства материала, применяемые для расчета взаимосвязанных электромагнитных, тепловых полей и полей термических напряжений в процессе поверхностной индукционной закалки стальных заготовок сложной формы.

3. Рассмотрена проблемно-ориентированная численная нелинейная модель технологического процесса поверхностной индукционной закалки стальной заготовки сложной геометрической формы с угловой зоной и этапы ее построения [26]. Решение взаимосвязанных электромагнитной, тепловой и упругопластической задач, реализованное в ППП ANSYS, позволило получить пространственно-временные распределения внутренних электромагнитных источников тепла, температур и термонапряжений на стадиях нагрева заготовки в индукционном нагревателе и ее охлаждения с помощью водяного душа [26].

4. Для подтверждения соответствия результатов моделирования известным физическим закономерностям и обоснования возможности их использования в

оптимизационной процедуре проведена верификация модели, разработанной в ANSYS Mechanical APDL, путем сравнения с результатами моделирования в Altair FLUX.

5. Анализ результатов моделирования позволил выявить пространственные области по объему заготовки, в которых температуры и термические напряжения превышают предельно допустимые согласно технологическим требованиям значения или приближаются к ним. Показано, что типовая конфигурация индуктора с прямоугольной формой витков не позволяет одновременно прогреть угловую зону и не перегреть выступ, что подтверждает необходимость перехода к более сложной геометрической форме витка индуктора, находящегося в области выступа стальной заготовки [26].

6. Представленная модель стадии индукционного нагрева, позволяющая проанализировать влияние вариаций основных технологических параметров процесса индукционного нагрева на динамику изменения тепловых полей и полей термонапряжений, может быть интегрирована в численные процедуры оптимального проектирования сложной формы витков индуктора и оптимизации его режимных параметров, обеспечивающие требуемую равномерность температурного поля при отсутствии недопустимых перегревов и превышения термонапряжений.

3. ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МЕТОДА

В данной главе разрабатывается 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 с учетом технологических ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения.

3.1 Постановка и методика решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора с учетом технологических ограничений

В данном разделе приводится постановка 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.

На основе результатов моделирования процесса индукционного нагрева, описанных в главе 2, выявлена принципиальная проблема формирования недопустимой неравномерности температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя заготовок сложной формы, особенно в их угловой зоне, при использовании квадратной формы витков и типовых режимов работы индуктора. Это обуславливает необходимость постановки задачи оптимизации конструкции и режимов функционирования индуктора. Постановка и решение задачи совместного поиска оптимальных конструктивных параметров (оптимального проектирования) и управляющих воздействий ОРП позволяет выбрать такие проектные и режимные решения, которые способствуют достижению максимального эффекта по выбранному показателю качества или комплексному критерию эффективности [10, 51, 68, 122-124].

Процесс поверхностного индукционного нагрева под закалку рассматривается как объект управления и оптимизации с распределенными параметрами, описываемый

нелинейной двумерной численной моделью, разработанной в ANSYS Mechanical APDL и описанной во второй главе.

Для постановки задачи оптимизируемые параметры конструкции индуктора представим в виде вектора $P^{(N)} = (p_i), i = \overline{1, N}$, а оптимизируемые режимные параметры в виде вектора $P^{(N)} = (p_j), j = \overline{1, \tilde{N}}$. В диссертационном исследовании вектор $P^{(N)}$ включает геометрические характеристики витков индуктора, а вектор $P^{(N)}$ включает параметры управляющего воздействия, наиболее существенно влияющие на процесс. Тогда совокупность векторов конструктивных $P^{(N)}$ и режимных $P^{(N)}$ параметров образует суммарный вектор $P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})} = (p_{\Sigma k}), k = \overline{1, N + \tilde{N}}$, искомым параметров, который в задаче совместной оптимизации имеет повышенную размерность $N_{\Sigma} = N + \tilde{N}$ [10]. Температурное распределение $T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$, зависящее от суммарного вектора $P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}$ конструктивных и режимных параметров, представляет управляемую функцию состояния ОРП, где x, y – пространственные координаты, t – время. Искомые параметры расширенного вектора $P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}$ стеснены физически обусловленными ограничениями:

$$p_{\Sigma k \min} \leq p_{\Sigma k} \leq p_{\Sigma k \max}, k = \overline{1, N_{\Sigma}}. \quad (3.1)$$

Результирующее температурное распределение в поверхностном слое заготовки в конце стадии индукционного нагрева металла под закалку должно соответствовать требованию, которое целесообразно сформулировать в виде задания максимально допустимой величины ε абсолютного отклонения результирующего температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя от заданного значения температуры [27].

При решении задачи совместной оптимизации с целью достижения максимально возможной равномерности температурного распределения предлагается использовать критерий, который минимизирует отклонение ε , т.е. гарантирует достижение минимально возможного в задаче с N_{Σ} оптимизируемыми параметрами абсолютного отклонения температурного распределения $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$ вдоль границы закаливаемого слоя от заданного значения T^* в конце стадии нагрева [8]:

$$I(P_{\Sigma}^{N_{\Sigma}}) = \max \left| T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) - T^* \right| \rightarrow \min_{P_{\Sigma}^{N_{\Sigma}}}, \quad (3.2)$$

где температуры $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$ могут быть рассчитаны с помощью численной ANSYS модели, X – толщина упрочняемого поверхностного слоя, τ^0 – момент окончания стадии нагрева, l – координата точки вдоль границы упрочняемого слоя.

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 (3.1), которые за заданное время τ^0 обеспечат перевод объекта, описываемого нелинейной численной двумерной ANSYS моделью, из исходного состояния в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимизации (3.2) [8, 27].

Как было показано в главах 1 и 2, в процессе скоростного индукционного нагрева заготовки могут образоваться недопустимые по технологии локальные перегревы поверхностного слоя, поэтому при постановке задачи необходимо учитывать фазовое ограничение на максимально допустимое значение температуры по объему поверхностного слоя вида:

$$T_{\max}(t) = \max_{x, y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) \leq T_{don}; \quad 0 \leq t \leq \tau^0, \quad (3.3)$$

где максимальная температура $\max_{x, y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$, определяется в каждый момент времени на множестве точек $x, y \in \Omega$ в пределах поверхностного слоя заготовки сложной формы.

Как известно из теории оптимального управления ОРП [8,10], для устранения обнаруженного перегрева поверхностного слоя детали необходимо решить задачу поиска управления на временном интервале, в пределах которого нарушается ограничение (3.3). На каждом временном отрезке этого участка осуществляется поиск такого управляющего воздействия, при котором выполняется условие:

$$T_{\max}(t) = \max_{x, y \in \Omega} T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) = T_{don}; \quad 0 \leq t_{T1} \leq t \leq t_{T2} \leq \tau^0, \quad (3.4)$$

где t_{T1} , t_{T2} – моменты начала и окончания участка движения по ограничению, определяемые по результатам решения задачи без учета ограничения (3.3) [8, 10].

Помимо образования локальных перегревов поверхностного слоя при скоростном индукционном нагреве могут возникать превышения термических напряжений,

появление которых приводит к необратимым последствиям (глава 1). Поэтому при постановке задачи необходимо также учитывать фазовое ограничение на максимально допустимое значение термических напряжений в закаливаемом слое вида:

$$\sigma_{max}(t) = \max_{x,y \in \sigma} \sigma(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) \leq \sigma_{доп}; \quad 0 \leq t \leq \tau^0, \quad (3.5)$$

где $\max_{x,y \in \sigma} \sigma(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})})$ – максимальное термонапряжение, определяемое в каждый момент времени на множестве точек $x, y \in \Omega$ в пределах поверхностного слоя заготовки сложной формы. Аналогично рассмотренному выше случаю, при нарушении ограничения (3.5) необходимо решить задачу управления на участке движения по фазовому ограничению, на каждом временном отрезке которого поиск управляющего воздействия осуществляется из условия:

$$\sigma_{max}(t) = \max_{x,y \in \sigma} \sigma(x, y, t, P_{\Sigma}^{(N_{\Sigma})}) = \sigma_{доп}; \quad 0 \leq t_{\sigma 1} \leq t \leq t_{\sigma 2} \leq \tau^0, \quad (3.6)$$

где $t_{\sigma 1}$, $t_{\sigma 2}$ – моменты начала и окончания особого участка управления, определяемые по результатам решения задачи без учета ограничения (3.5) [8, 14, 131].

В диссертации разработана методика решения задачи совместной оптимизации (3.1)-(3.2) с учетом технологических ограничений (3.3) и (3.5), которая в общем виде представлена на рис. 3.1

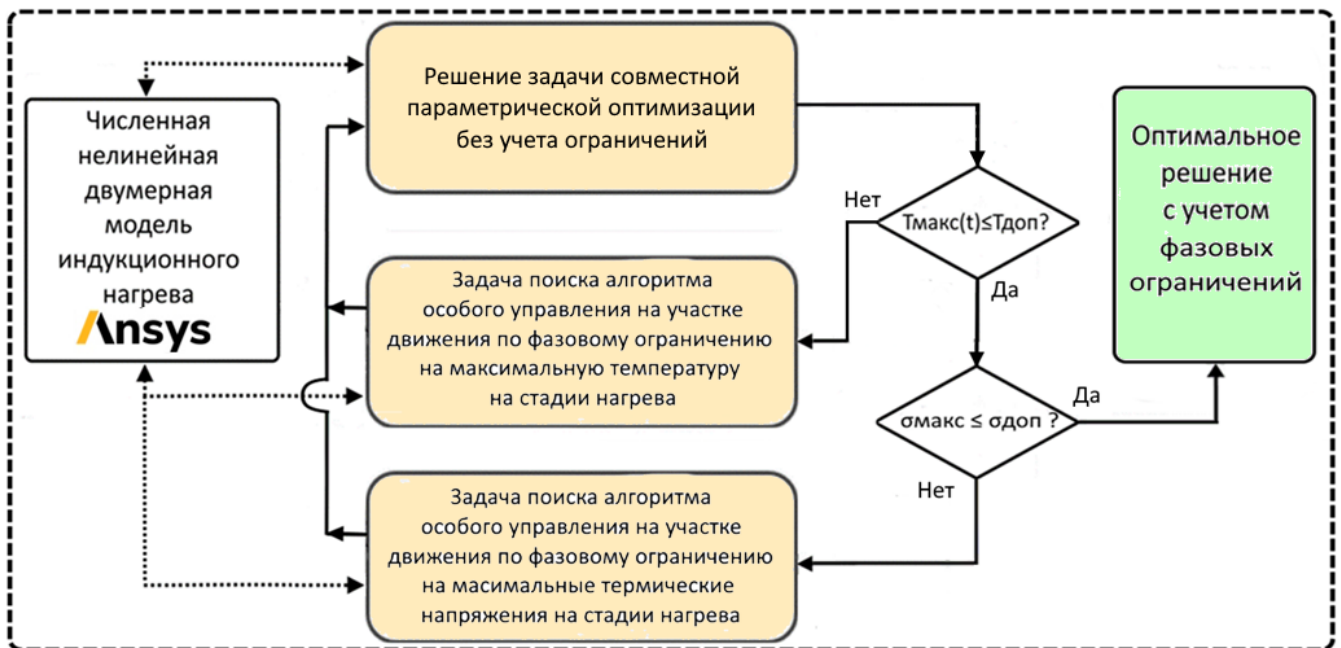


Рисунок 3.1 – Методика решения задачи совместной оптимизации с учетом технологических ограничений

Согласно представленной методике, процесс решения представляет итерационную процедуру. Сначала решается задача совместной оптимизации без учета технологических ограничений (3.3) и (3.5) с интеграцией численной модели температурных полей и полей термонапряжений и производится проверка результатов решения на условие выполнения ограничений на температуру (3.3) и термические напряжения (3.5). При нарушении одного или обоих ограничений (3.3), (3.5) предполагается переход к задачам поиска алгоритмов управления на одном или двух участках движения по ограничениям из условий (3.4), (3,6). После введения дополнительных участков 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 для уточнения вектора оптимизируемых параметров с учетом найденного управления на участках движения по ограничениям. Описанный процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено решение задачи совместной оптимизации, удовлетворяющее ограничениям (3.3) и (3.5).

В разделе 3.3 рассмотрены различные случаи нарушения ограничений (3.3) и (3.5) и предложены для них варианты решения задач управления током индуктора на стадии нагрева.

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

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

- обеспечивает выполнение диктуемых технологическими требованиями условий отсутствия локальных перегревов и превышений допустимых термонапряжений по всему объему заготовки и на всем протяжении процесса.

3.2 Решение задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления на основе альтернансного метода

Решение сформулированной в п. 3.1 задачи совместной параметрической оптимизации конструкции витков и алгоритмов управления индуктором для поверхностного нагрева под индукционную закалку стальных заготовок сложной формы 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, и позволяет свести исходную оптимизационную задачу к решению системы трансцендентных уравнений, замкнутых относительно всех неизвестных параметров процесса [8, 10, 20,79].

В теории альтернансного метода показано, что если оптимальный по критерию (3.2) процесс индукционного нагрева характеризуется совокупностью N_Σ оптимизируемых параметров, а величина $\varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)}$ представляет собой минимальное из возможных отклонений ε_0 температуры в конце процесса нагрева от заданного значения, достижимых в классе задач с N_Σ неизвестными параметрами, то отклонения формируют убывающий ряд неравенств [8, 20]:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \varepsilon_{\min}^{(3)} \dots > \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma)} > \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(N_\Sigma^*)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0 \quad (3.10)$$

Доказано, что заданное число N_Σ неизвестных параметров процесса однозначно связано с неизвестным значения ε_0 следующим правилом (3.11), устанавливающим N_Σ по месту в последовательности неравенств [8, 10, 20, 79]:

$$N_\Sigma = S \text{ для всех } \varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(S)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(S-1)}. \quad (3.11)$$

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 $T(X, l_j, \tau^0, P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)})$ 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. Эти температурные отклонения равны ε_0 и представляют собой знакопередающиеся отклонения $T(X, l_j, \tau^0, P_{\Sigma \text{opt}}^{(N_\Sigma)}) - T^*$ [8, 10, 20, 79]. Число M точек $l_j^{\text{opt}}, j = \overline{1, M}$ всегда равно или больше числа N_Σ оптимизируемых параметров. При этом принципиальной особенностью

применения альтернансного метода в диссертации является распространение альтернансных свойств оптимальных решений на температурные распределения $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})})$ вдоль пространственной границы закаливаемого слоя сложной геометрической формы, которую предлагается рассматривать как развертку по одной условной пространственной координате l .

Сказанное позволяет записать систему соотношений для поиска оптимальных значений параметров, составляющих вектор $P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})}$, в следующем виде [8, 10, 79]:

$$\begin{aligned} T(X, l_j^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})}) - T^* &= \varepsilon_0; \quad j = \overline{1, M}; \\ P_{\Sigma opt}^{N_{\Sigma}} &= (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, \dots, P_{\Sigma N}^{opt}); \quad 0 \leq l_1^{opt} < l_2^{opt} < \dots < l_M^{opt} \leq L, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где L – длина упрочняемого слоя.

В случае, когда ε_0 совпадает с минимально достижимым в задаче с N_{Σ} оптимизируемыми параметрами значением $\varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})}$, между значениями N_{Σ} и M существует зависимость, определяемая выражением $M = N_{\Sigma} + 1$. При этом заданная точность ε_0 в задаче с N_{Σ} неизвестными оптимизируемыми параметрами либо не достигает предельной величины $\varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})}$ согласно (3.13), либо оказывается равной ей согласно (3.14) [8, 10, 79].

$$\varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma}-1)} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})} \quad (3.14)$$

Таким образом, свойства результирующего температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя с учетом соотношений (3.12) – (3.14) и указанных выше утверждений, могут быть записаны в следующем виде:

$$\left\{ \begin{aligned} T(X, l_j^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})}) - T^* &= (-1)^j \psi \varepsilon_0, \quad j = \overline{1, M}, \\ P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})} &= (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, \dots, P_N^{opt}), \quad \psi = \pm 1; \quad 0 \leq l_1^{opt} < l_2^{opt} < \dots < l_M^{opt} \leq L; \\ M &= \begin{cases} N_{\Sigma}, & \text{if } \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma}-1)} \\ N_{\Sigma} + 1, & \text{if } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})} \end{cases}; \end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

где множитель $(-1)^j$ обеспечивает знакопеременность температурных отклонений в точках с координатами l_j^{opt} , а коэффициент $\psi = \pm 1$ определяет два возможных варианта по знаку описываемых отклонений в каждой из таких точек [8, 20].

Координаты точек $l_j^{opt}, j = \overline{1, M}$ вдоль границы закаливаемого слоя, в которых достигаются предельные отклонения температуры от заданной, неизвестны и должны находиться в результате решения задачи оптимизации. Для этого, система соотношений (3.15) должна быть дополнена условиями для поиска экстремумов [8, 20]:

$$\frac{\partial T(X, l_m^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})})}{\partial l} = 0; \quad m = \overline{1, M_1 < M}. \quad (3.16)$$

В итоге получаем в общем виде систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} T(X, l_j^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})}) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, \quad j = \overline{1, M}, \\ \frac{\partial T(X, l_m^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})})}{\partial l} = 0; \quad m = \overline{1, M_1 < M}; \\ P_{\Sigma opt}^{(N_{\Sigma})} = (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, \dots, P_{\Sigma N}^{opt}), \quad \psi = \pm 1; \quad 0 \leq l_1^{opt} < l_2^{opt} < \dots < l_M^{opt} \leq L; \\ M = \begin{cases} N_{\Sigma}, & \text{if } \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma}-1)} \\ N_{\Sigma} + 1, & \text{if } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})} \end{cases}, \end{array} \right. \quad (3.17)$$

замкнутую относительно всех неизвестных: оптимальных значений параметров $P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, \dots, P_{\Sigma N}^{opt}$; значения минимакса $\varepsilon_{\min}^{(N_{\Sigma})}$; координат точек, в которых достигается максимальное отклонение температуры $l_j^{opt}, j = \overline{1, M}$ [8, 10, 22, 79].

Для решения оптимизационной задачи на основе альтернансного метода предлагается следующая вычислительная технология [8, 10, 22, 79].

На первом этапе необходимо решить задачу, сформулированную для значения точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ для одного оптимизируемого параметра при $N=1$. Форма конечного распределения температуры для этого случая показана на рис. 3.2 [8, 10, 22, 79].

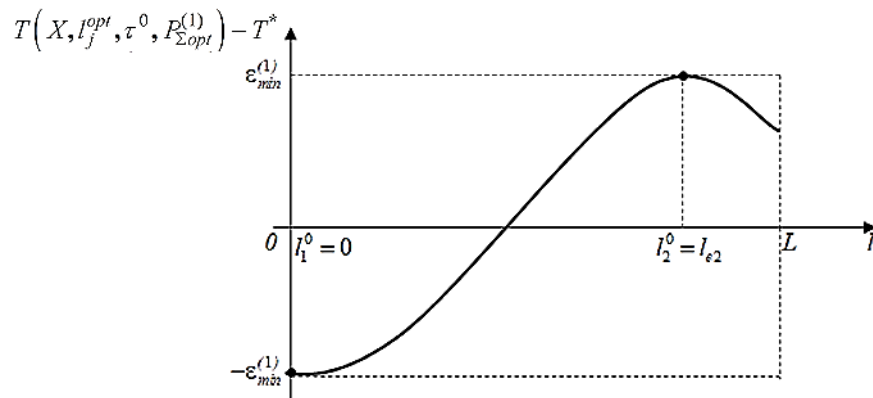


Рисунок 3.2 – Оптимальное конечное распределение температуры для $\varepsilon_{\min}^{(1)}$

Система уравнений на основе альтернансного метода для одного оптимизируемого параметра записывается в виде (3.18):

$$\begin{cases} T(X, 0, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(1)}) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ T(X, l_2^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(1)}) - T^* = \varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ \frac{\partial T(X, l_2^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(1)})}{\partial l} = 0. \end{cases} \quad (3.18)$$

Если заданное значение точности $\varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$, то необходимо решить комплекс задач для набора значений $\varepsilon = \varepsilon'$, убывающих с малыми приращениями от $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ до заданного значения ε_0 . Каждое значение предельно достижимой точности нагрева для нового числа оптимизируемых параметров требует задания соответствующего вида конечного распределения температуры вдоль границы закаливаемого слоя и записи по общему правилу системы уравнений, аналогичной (3.15). На рис. 3.3 представлен пример оптимального температурного распределения для точности $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(3)}$, соответствующей системе уравнений [8, 10, 22, 79]:

$$\begin{cases} T(X, l_j^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(3)}) - T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(3)}, j = \overline{1, 4}, \\ P_{\Sigma opt}^{(3)} = (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, P_{\Sigma 3}^{opt}); \\ 0 = l_1^{opt} < l_2^{opt} < l_3^{opt} < l_4^{opt} = L; \\ \frac{\partial T(X, l_j^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(3)})}{\partial l} = 0; m = \overline{2, 3}. \end{cases} \quad (3.19)$$

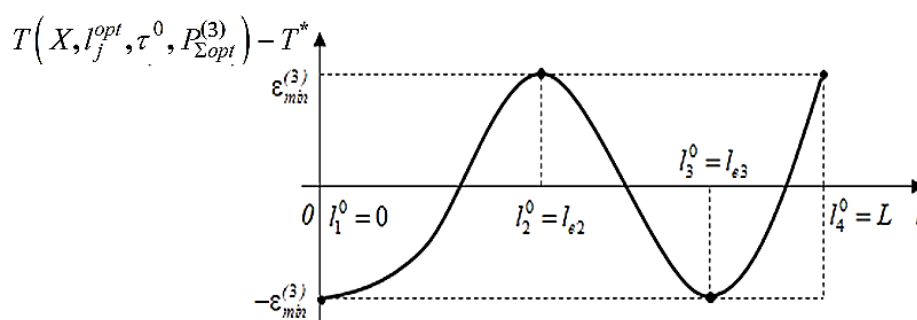


Рисунок 3.3 – Форма конечного распределения температуры по точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(3)}$

Системы уравнений общего вида (3.17) решаются численно. Основной особенностью решения таких систем уравнений в диссертации является необходимость вычисления температуры $T(X, l_j^{opt}, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(N_s)})$ в каждой точке с помощью численной нелинейной модели, разработанной в программе ANSYS Mechanical APDL и подробно описанной во второй главе. Следовательно, процедура решения системы уравнений

должна предусматривать интегрирование численной ANSYS модели (см. п. 4.2). Одной из возможностей программной реализации численного решения уравнений вида (3.17) является использование программного обеспечения MATLAB, которое предоставляет различные инструменты для оптимизации, включая нелинейные решатели (fsolve, lsqnonlin, fmincon и т. д.) и встроенный инструмент для интеграции кодов ANSYS в цикл оптимизации [8, 10, 21, 22, 23, 27, 79]. Программная реализация численной процедуры решения задачи совместной оптимизации описана в п. 4.3.

Таким образом разработанные на базе альтернансного метода оптимизации СРП методика и вычислительная технология решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой отличается от известных тем, что:

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

- альтернансные 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;

- численное решение систем уравнений, построенных на основе альтернансного метода, реализуется на основе интеграции нелинейной двумерной ANSYS модели в оптимизационную процедуру.

Описанная методика может быть применена для широкого круга оптимизационных задач, формулировка которых укладывается в общую постановку, приведенную в разделе 3.1.

3.3 Задача поиска управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям

Согласно методике, разработанной в п. 3.1 (рис. 3.1), после решения задачи совместной параметрической оптимизации без учета ограничений, анализируется температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя заготовки в конце оптимальной стадии нагрева и максимальное значение температуры заготовки на всем протяжении нагрева. Если условие (3.3) выполняется, то считается, что найдено

оптимальное решение с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру. Тогда аналогичная проверка выполняется для учета фазовых ограничений на термические напряжения (3.5). Если условие (3.5) выполняется, то считается, что найдено оптимальное решение с учетом фазового ограничения на максимально допустимые термонапряжения. Таким образом, если задача совместной оптимизации решена без учета технологических ограничений, и при этом ограничения (3.3) и (3.5) не нарушаются, то можно утверждать, что процесс является оптимальным и с учетом заданных ограничений.

Согласно методике, разработанной в п. 3.1 (рис. 3.1), при нарушении технологических ограничений (3.3) и/или (3.5) предлагается перейти к решению задачи поиска алгоритмов управления на участках движения по ограничениям. В случае нарушения ограничения (3.3) при решении задачи поиска алгоритма управления определяется временной интервал, на котором наблюдается перегрев, и на каждом шаге расчета процесса на этом интервале осуществляется поиск такого управляющего воздействия, при котором выполняется условие (3.4). В случае нарушения ограничения (3.5) аналогично определяется временной интервал, на котором наблюдается превышение допустимого термонапряжения, и на каждом шаге расчета процесса осуществляется поиск такого управляющего воздействия, при котором выполняется условие (3.6).

Как показано в [8], при решении задачи по методике, описанной в п. 3.1 (рис. 3.1), возможны следующие типовые варианты нарушения технологических ограничений на максимальную температуру и термические напряжения на стадии индукционного нагрева.

1) На рисунке 3.4 представлен вариант нагрева при управлении, когда наблюдаются временные интервалы, на которых происходит превышение технологического ограничения на максимальную температуру (3.3) и максимальные термические напряжения (3.5) в оптимальном процессе, рассчитанном без учета ограничений. Для максимальной температуры превышение ограничения зафиксировано начиная с момента времени $t^{(3)}$. Для термических напряжений рассматриваются два возможных варианта их дальнейшего формирования [8].

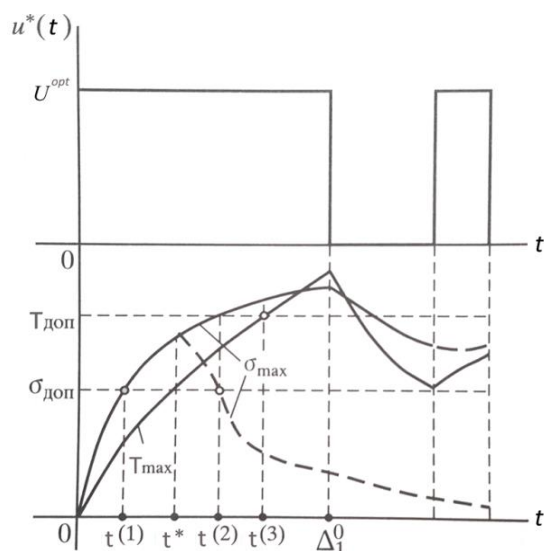


Рисунок 3.4 – Алгоритм управления $u^*(t)$, максимальная температура $T_{\max}(t)$, максимальное термонапряжение $\sigma_{\max}(t)$ в оптимальном процессе нагрева без учета технологических ограничений

Первый вариант предполагает учет тепловых потерь в виде постоянной величины, и в этом случае максимальные термические напряжения $\sigma_{\max}(t)$ будут монотонно приближаться к некоторому постоянному уровню (рис. 3.4) по мере выравнивания скорости подъема температуры. Другой вариант предполагает конвективный характер теплоотдачи, при котором температурные перепады по толщине заготовки уменьшаются вместе с ростом тепловых потерь по мере возрастания температуры поверхности. Это может привести к соответствующему уменьшению максимального значения термонапряжений $\sigma_{\max}(t)$ после достижения некоторого максимума при $t^{(1)} = t^*$ (рис. 3.4) [8].

При этом сценарии ограничение (3.5) на термические напряжения тоже нарушается, но интервал превышения допустимого предела значительно короче, т.к. $\sigma_{\max}(t)$ начинает уменьшаться после достижения некоторого максимума при $t = t^*$ из-за того, что температурные перепады по толщине заготовки уменьшаются вместе с ростом тепловых потерь по мере возрастания температуры поверхности [8]. В этом случае необходимо провести корректировку оптимального управления на участках, где наблюдается превышение ограничений. Задача сводится к поиску таких значений управляющих воздействий, которые позволят поддерживать значения температур и термических напряжений на предельно допустимых уровнях $T_{\text{доп}}$ и $\sigma_{\text{доп}}$ [8].

На рисунке 3.5 представлен вариант алгоритма оптимального управления на стадии нагрева, найденный с учетом технологических ограничений (3.3) и (3.5).

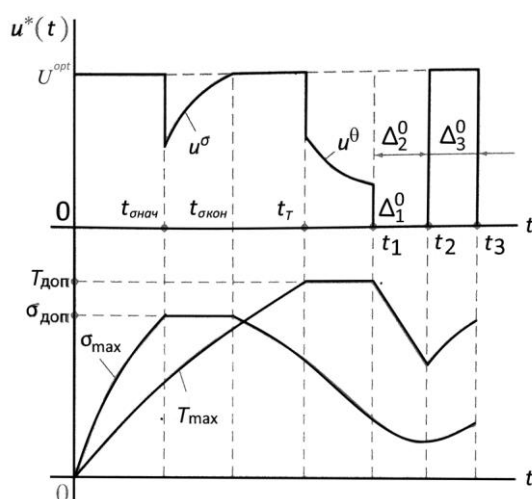


Рисунок 3.5 – Алгоритм управления $u^*(t)$, максимальная температура $T_{\max}(t)$, максимальные термонапряжения σ_{\max} , в оптимальном процессе нагрева с технологическими ограничениями по температуре и термическим напряжениям

Участок движения по ограничению на термические напряжения σ_{\max} начинается в момент времени $t_{\text{снач}}$. В этот момент температура обрабатываемой детали T_{\max} находится на уровне ниже допустимого значения $T_{\text{доп}}$. На участке $(t_{\text{снач}}, t_{\text{скон}})$ происходит движение по ограничению на термические напряжения, на котором выполняется условие (3.6). По достижению определенных значений термические напряжения начинают снижаться на интервале $(t_{\text{скон}}, t_T)$ при одновременном росте температуры. После чего следует участок движения по ограничению, на котором выполняется условие (3.4). Управляющие воздействия $u^\sigma(t)$ на участке движения по ограничению (3.6) и $u^T(t)$ на участке движения по ограничению (3.4) скачкообразно снижаются по отношению к максимальному значению U^{opt} в начальный момент особого участка с целью прекращения роста термонапряжений и температуры, соответственно. На последующих интервалах оптимального процесса ограничения не нарушаются [8].

Алгоритм управления в общем виде для случая одновременного нарушения ограничений (3.3) и (3.5):

$$u^*(t) = \begin{cases} U^{\text{opt}}, & t \in (0; t_{\text{снач}}); \\ u^\sigma(t), & t \in (t_{\text{снач}}; t_{\text{скон}}); \\ U^{\text{opt}}, & t \in (0; t_T); \\ u^\theta(t), & t \in (t_T; \Delta_1^0); \\ \frac{U^{\text{opt}}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], & t_{j-1} \leq t \leq t_j, j = \overline{2, N} \end{cases} \quad (3.20)$$

2) Если на оптимальной стадии нагрева детали, найденной в результате решения оптимизационной задачи без учета ограничений (3.3) и (3.5), температура достигает предела $T_{доп}$ на интервале $(0; \Delta_1^0)$, а термические напряжения не достигают максимального допустимого значения, то в таком случае из алгоритма (3.20) исключается участок движения по ограничению (3.5), на котором выполняется условие (3.6) (рис.3.6) [8].

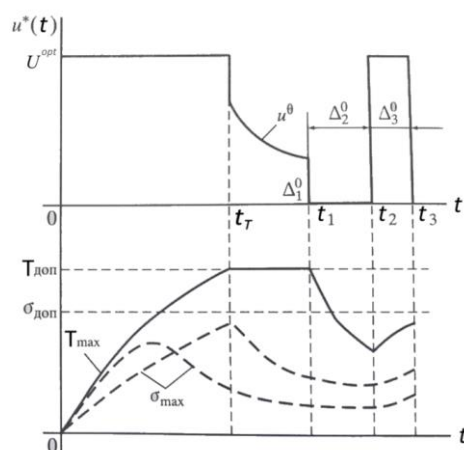


Рисунок 3.6 – Оптимальный процесс нагрева без участка движения по ограничению (3.5)
Тогда алгоритм управления принимает следующий общий вид:

$$u^*(t) = \begin{cases} U^{opt}, & t \in (0; t_T); \\ u^\theta(t), & t \in [t_T; \Delta_1^0); \\ \frac{U^{opt}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], & \Delta_{j-1}^0 \leq t \leq \Delta_j^0, j = \overline{2, N} \end{cases} \quad (3.21)$$

3) Если в процессе нагрева возникает только превышение допустимого предела термических напряжений на первом интервале $(0; \Delta_1^0)$, то в таком случае из алгоритма (3.20) исключается участок движения по ограничению (3.3), на котором выполняется условие (3.4) (рис.3.7) [8].

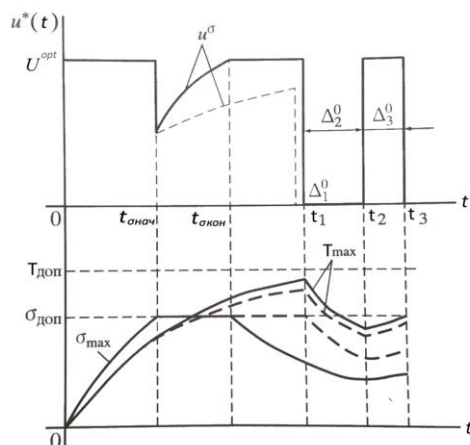


Рисунок 3.7 – Оптимальный процесс нагрева без участка движения по ограничению (3.3)

Тогда алгоритм управления принимает следующий общий вид:

$$u^*(t) = \begin{cases} U^{opt}, & t \in (0; t_{\sigma нач}); \\ u^\sigma(t), & t \in (t_{\sigma нач}; t_{\sigma кон}); \\ \frac{U^{opt}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], & \Delta_{j-1}^0 \leq t \leq \Delta_j^0, j = \overline{2, N} \end{cases} \quad (3.22)$$

Поиск алгоритмов управления $u^T(t)$ и $u^\sigma(t)$ в (на участках движения по ограничениям (3.3) и (3.5) предлагается осуществлять из условий (3.4) и (3.6) численно. В работе используется стандартная функция MATLAB, минимизирующая среднеквадратичное отклонение температуры $T_{max}(t)$ и термических напряжений $\sigma_{max}(t)$ от заданных значений $T_{доп}$, и $\sigma_{доп}$. Принципиальной особенностью предлагаемой методики является то, что максимальное значение температуры $T_{max}(t) = \max_{x, y \in \Omega} T(x, y, t, P_\Sigma^{(N_\Sigma)})$ и максимальное значение термических напряжений $\sigma_{max}(t) = \max_{x, y \in \sigma} \sigma(x, y, t, P_\Sigma^{(N_\Sigma)})$ определяются в каждый момент времени на множестве точек $x, y \in \Omega$ в пределах всего объема поверхностного слоя заготовки сложной формы. При этом температуры $T_{max}(t)$ и термические напряжения $\sigma_{max}(t)$, сравниваемые с допустимыми $T_{доп}$, и $\sigma_{доп}$, находятся на каждом шаге численной процедуры поиска с помощью модели процесса, разработанной в специализированном программном пакете ANSYS.

Найденное управляющее воздействие на участке нарушения ограничений в виде ступенчато-постоянной функции при необходимости можно упростить путем аппроксимации с помощью непрерывной, например, полиномиальной функции.

Пример аппроксимации управления $u^T(t)$ для участка поддержания максимальной температуры на допустимом уровне представлен на рисунке 3.8 [8].

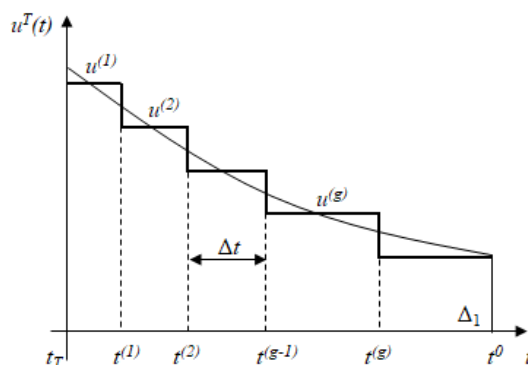


Рисунок 3.8 – Кусочно-постоянная аппроксимация управления $u^T(t)$

3.4 Выводы по третьей главе

1. В разделе рассматривается постановка задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева под поверхностную закалку стальных ответственных деталей сложной геометрической формы с учетом технологических ограничений на максимально допустимую температуру и максимально допустимые термонапряжения. Решение задачи совместного поиска оптимальных конструктивных параметров и алгоритмов управления ОРП в предложенной постановке позволяет выбрать такие проектные и режимные решения, которые способствуют достижению максимального эффекта по выбранному показателю качества или комплексному критерию эффективности.

2. Для решения задачи совместной оптимизации с учетом технологических ограничений разработана общая методика, включающая решение задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений, проверки условий соблюдения ограничений на максимальную допустимую температуру и термические напряжения, при нарушении которых осуществляется переход к задачам поиска алгоритмов управления на особых участках.

3. Разработанная общая методика совместной оптимизации проектных решений и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки позволяет одновременно оптимизировать конструктивные и режимные параметры индуктора для обеспечения максимально равномерного температурного распределения в упрочняемом слое деталей сложной формы. Кроме того, она обеспечивает выполнение диктуемых технологическими требованиями условий отсутствия локальных перегревов и превышения допустимых термонапряжений на всем протяжении процесса.

4. На базе альтернативного метода оптимизации СРП разработана методика и вычислительная технология решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки, в которой рассматривается суммарный вектор оптимизируемых параметров повышенной размерности, представляющий совокупность векторов конструктивных и режимных параметров. В предложенной методике 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.

5. Разработана методика численного решения нелинейных задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям для различных возможных типовых вариантов нарушения технологических ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения в закаливаемом слое заготовки сложной геометрической формы.

4. ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕДУР В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB

Для решения сформулированных в п. 3.1 задач по предложенным методикам (пп. 3.2-3.3), в диссертации разработаны численные процедуры, для реализации которых необходима взаимосвязанная работа пакета прикладных программ MATLAB и программного пакета для численного моделирования ANSYS Mechanical APDL в рамках единого программного комплекса.

В четвертой главе описано построение численных процедур для совместного решения задач оптимального проектирования индуктора и управления режимами его работы. Предложена общая схема численной реализации оптимизационных процедур в программном комплексе в ППП MATLAB, который позволяет выполнять итерационный поиск решения задач оптимизации. Подробно описана интеграция двумерной нелинейной модели взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, а также полей термических напряжений, разработанной в пакете ANSYS Mechanical APDL, в численные процедуры.

4.1 Общая схема численных процедур оптимизации

В диссертационной работе для решения сформулированных в разделе 3.1 задач совместной оптимизации конструктивных и режимных параметров и поиска управления применяется программный пакет для численного моделирования ANSYS Mechanical APDL и программный пакет для решения инженерных задач MATLAB, которые, работая совместно и осуществляя обмен данными между собой, образуют программный комплекс. Преимуществами разработанного программного комплекса являются:

- универсальный функционал, позволяющий решать задачи оптимизации в различных постановках в рамках формулировки, представленной в п. 3.1, на основе методик, разработанных в п. 3.2;
- возможность использования готовых доступных приложений и наличие широкого набора оптимизационных функций из инструментария Optimization Toolbox.
- наличие полной документации о функциональных возможностях программных инструментов в открытом доступе.

Разработанный программный комплекс реализует численные процедуры оптимизации, позволяющие решать системы трансцендентных уравнений, построенные на основе альтернансного метода и замкнутые относительно всех неизвестных, включая конструктивные и режимные параметры [23]. Методика конструирования систем уравнений для решения задач совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления сформулированы в главе 3 (п. 3.2). Кроме того, разработанный программный комплекс реализует численные процедуры поиска управления на участках движения по фазовым ограничениям на основе методики, предложенной в главе 3 (п. 3.3).

Общая схема программного комплекса для реализации численных процедур представлена на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Общая схема численных оптимизационных процедур в программном комплексе

Работа рассматриваемого программного комплекса представляет собой взаимодействие в определенной последовательности составляющих его блоков, представленных на рис. 4.1. В блоке «Ввод исходных данных...» в пакете прикладных программ MATLAB задаются начальные значения параметров конструкции индуктора, а также параметры, определяющие режимы работы индукционной нагревательной установки. Исходные данные записываются в текстовые файлы и используются при численном моделировании. Затем из программного пакета MATLAB происходит запуск исполняемого файла программного пакета ANSYS для численного моделирования. После расчета образуются выходные данные, которые проходят процедуру

постобработки и формируются в необходимые массивы. В рассматриваемых оптимизационных задачах выходные данные численной двумерной нелинейной модели (см. главу 2) представляют собой пространственно-временные распределения температуры и термонапряжений по объему нагреваемой детали. Обработанные данные моделирования передаются в блоки решения задач оптимизации, разработанные в ППП MATLAB на основе предложенных в главе 3 методик. Взаимодействие между MATLAB и ANSYS осуществляется по технологии клиент-сервер. Обмен данными между пакетами ANSYS и MATLAB на каждом шаге расчета численных процедур осуществляется при помощи последовательной записи и чтения текстовых файлов.

Решение систем трансцендентных уравнений общего вида (3.17), построенных на основе альтернативного метода, а также поиск алгоритмов управления движения по ограничениям (3.3) и (3.5) из условий (3.4) и (3.6) могут быть реализованы с помощью одной из встроенных функций MATLAB набора Optimization Toolbox. В случае нахождения решения с заданной точностью полученные значения оптимизируемых параметров сохраняются в отдельный текстовый файл; в противном случае процесс продолжается и начинается новая итерация процедуры оптимизации, на которой вычисляются новые значения оптимизируемых параметров и повторно выполняется расчет численной модели с новыми данными. Итерационный процесс заканчивается по достижении заданной точности решения или заданного числа итераций.

Основной причиной выбора MATLAB в качестве инструмента для разработки оптимизационных процедур является набор предоставляемых готовых инструментов оптимизации Optimization Toolbox [101], который включает широкий спектр разнообразных функций для решения систем нелинейных уравнений: `fsolve`, `lsqnonlin`, `fmincon`, `lsqcurvefit`, `fminunc`, `fzero` и др. [101]. Поскольку рассматриваемые в диссертации задачи оптимизации требуют задания ограничений искомых оптимизируемых параметров, для их решения необходимо использовать функции `lsqcurvefit`, `lsqnonlin` и `fmincon`, которые позволяют учитывать набор ограничений различного вида. В диссертации для поиска решения нелинейных трансцендентных систем уравнений, а также для поиска алгоритма управления на участках движения по ограничениям используется функция `lsqnonlin`. С ее помощью выполняется итерационный поиск значений неизвестных переменных в ограниченных интервалах путем минимизации значения нелинейной функции, которое определяется как сумма

квадратов невязок, формирующихся при итерационном расчете системы однородных нелинейных уравнений.

Работа программного комплекса представляет собой взаимосвязанный процесс обмена данными между численными процедурами в MATLAB и двумерной нелинейной ANSYS моделью, интеграция которой в численные процедуры рассмотрена в следующем разделе.

4.2 Интеграция численной ANSYS модели в оптимизационную процедуру

Основной особенностью численных процедур является интеграция численной модели, разработанной в ANSYS Mechanical APDL (глава 2) в итерационный процесс расчета, как показано на общей схеме реализации оптимизационных процедур в программном комплексе (рис. 4.1). Процесс обмена данными обеспечивается при помощи связующих команд, отвечающих за запись, чтение и запуск программного пакета для численного моделирования. В свою очередь команды необходимые для обмена данных можно разделить на команды, выполняемые в MATLAB и на команды, выполняемые в ANSYS Mechanical APDL.

Команды для обмена данных в MATLAB записываются в окне графического интерфейса Editor, для чего создается новый файл, в который записывается часть кода, выполняющая функции по добавлению файлов и записи в них значений оптимизируемых параметров. Команда (4.1) включает наименование файла, его расширение и тип доступа к файлу:

$$\text{fileID}=\text{fopen}(\text{'имя_файла.расширение'}, \text{'тип доступа'}); \quad (4.1)$$

Возможные типы доступа к файлу представлены в таблице 4.1 [101].

Таблица 4.1 – Перечень типов доступа к файлу

| Синтаксис команды | Описание команды |
|-------------------|--|
| 'r' | Тип доступа: для чтения. |
| 'w' | Тип доступа: создание нового файла или открытие существующего для записи. Текущее существующее содержимое файла перезаписывается. |
| 'a' | Тип доступа: создание нового файла или открытие существующего для записи. Текущее содержимое остается, а новые данные добавляются в конец файла. |
| 'r+' | Тип доступа: Открытие файла для чтения и записи. |
| 'w+' | Тип доступа: Открытие или создание нового файла для чтения и записи. Текущее существующее содержимое файла перезаписывается. |
| 'a+' | Тип доступа: Открытие или создание нового файла для чтения и записи. Текущее |

| | |
|-----|--|
| | содержимое остается, а новые данные добавляются в конец файла. |
| 'A' | Тип доступа: открытие файла для добавления без автоматической очистки текущего выходного буфера. |
| 'W' | Тип доступа: открытие файла для записи без автоматической очистки текущего выходного буфера. |

Команда (4.1) дополняется командой (4.2), которая определяет, какие данные записываются в файл и в каком формате [101]:

```
fprintf(fileID, '%A.Bf\n', x(1));
```

 (4.2)

где fileID – идентификатор файла, '%A.Bf\n' – формат числа с фиксированной точкой на новой строке. В случае выполнения команды (4.2) в файл запишется значение оптимизируемого параметра, в котором общее число знаков A, B – число знаков после запятой, с наименованием переменной x(1). Команды (4.1) и (4.2) дополняются командой (4.3) для закрытия файла и очистка идентификатора:

```
fclose(fileID);  
clear fileID;
```

 (4.3)

Команды (4.1) – (4.3) в совокупности выполняют функции создания файла, записи в него численного значения с фиксированной точкой на основе описанных функций из используемого алгоритма, закрытие файла и очистку идентификатора [101]:

```
fileID=fopen('input.txt', 'w');  
fprintf(fileID, '%10.6f\n', x(1));  
fclose(fileID);  
clear fileID;
```

 (4.4)

Команды для считывания данных в ANSYS Mechanical APDL записываются в файл сценария расчета со всеми исходными данными для моделирования. Выполнение чтения файла производится при помощи стандартных функций ANSYS – «*DIM», «*VREAD», которые дополняются набором опций для гибкой настройки. Функция *DIM определяет параметр массива и его размеры. Синтаксис функций имеет вид [100]:

```
*DIM, Par, Type, IMAX, JMAX, KMAX, Var1, Var2, Var3, CSYSID
```

 (4.5)

Описание настроек функции *DIM представлено в таблице 4.2 [100].

Таблица 4.2 – Описание аргументов функции *DIM

| Синтаксис команды | Описание команды |
|-------------------|------------------|
|-------------------|------------------|

| | |
|------------|---|
| Par | Имя параметра |
| Type array | Массивы аналогичны стандартным массивам FORTRAN (индексы — целые числа) (по умолчанию). Номера индексов для строк, столбцов и плоскостей представляют собой последовательные значения, начинающиеся с единицы. Используется для одно-, двух- или трехмерных массивов. |
| IMAX | Протяженность первого измерения (строки). (Для <i>Type = STRING IMAX</i> округляется до следующего числа, кратного восьми, и имеет ограничение 248). По умолчанию = 1. |

Функция *VREAD выполняет чтение данных из текстового файла и создает вектор параметров массива или матрицу [104]:

$$*VREAD, ParR, Fname, Ext, --, Label, n1, n2, n3, NSKIP. \quad (4.6)$$

Описание настроек функции *VREAD представлено в таблице 4.3 [100].

Таблица 4.3 – Описание аргументов функции *VREAD

| Синтаксис команды | Описание команды |
|-------------------|--|
| ParR | Имя результирующего вектора параметров массива. См. *SET для ограничений имени. Параметр должен существовать в виде размерного массива [*DIM]. |
| Fname | Имя файла и путь каталогу. Неуказанный путь к каталогу по умолчанию указывает на рабочий каталог; в этом случае вы можете использовать все 248 символов для имени файла. |
| Ext | Расширение файла |
| -- | Неиспользуемое поле. |
| Label | Может принимать значения IJK, IKJ, JIK, JKI, KIJ, KJI или быть пустым (IJK). |
| n1, n2, n3 | Читается как (((ParR(i,j,k), k = 1,n1), i = 1, n2), j = 1, n3) для = LabelKIJ. n2 и n3 по умолчанию 1. |
| NSKIP | Количество строк в файле, которые будут пропущены при чтении. |

Формат определяет количество полей, которые должны быть прочитаны для каждой записи, ширину поля и размещение десятичной точки (если не указано в значении). Операция чтения следует принятым в системе соглашениям FORTRAN FORMAT. Команды определения переменной (4.5) и чтения из файла (4.6) дополняются аналогичной в MATLAB надстройкой – (F10.6). Пример части кода для чтения числа из файла ППП ANSYS из используемого алгоритма представлен ниже [100]:

$$*DIM, geom_param1, , 1 \quad (4.7)$$

$$*VREAD, geom_param1(1), Input, txt, , , , , 0$$

(F10.6)

Далее код в MATLAB дополняется командой для запуска программного пакета ANSYS из MATLAB следующего вида [100]:

```
dos(' "E:\Program Files\ANSYS
Inc\v140\ANSYS\bin\winx64\ANSYS140.exe" -b -np 12 -dir "D:\Program
Files \Model test 29.07" -i "D:\Program Files\Model test
29.07\model.dat" -o "D:\Program Files\Model test
29.07\log_res.txt" '),
```

(4.8)

где ' -b ' свернутый режим работы программы (бат файл); ' -np 12 ' – определяет число ядер ЦП (12 ядер), с которыми будет работать программа; ' -dir ' – путь к папке с моделью; ' -i ' – путь к файлу из папки с моделью со скриптом сценария расчета; ' -o ' – лог файл.

Таким образом, формируется часть алгоритма численных процедур, обеспечивающая взаимодействие между программными пакетами ANSYS и MATLAB, согласно которому создаются файлы оптимизируемых параметров, для которых проводятся операции записи и чтения, а также выполняется запуск ANSYS. Реализация оптимизационной процедуры, основанная на совместном использовании пакетов ANSYS и MATLAB, более подробно рассмотрена в п.4.3.

4.3 Программная реализация блока оптимизации и управления

Программная реализация оптимизационной процедуры и поиска управления начинается с анализа инструментов для подбора необходимого сценария расчета. Заранее известно, что расчеты представляют итерационный процесс, и это значит, что функция поиска решения должна обеспечить итерационный пересчет с последовательным приближением, который заканчивается при достижении определенных условий, установленных в алгоритме расчета по достижении: требуемой точности; требуемого отклонения значения минимизируемой нелинейной функции по сравнению с предыдущей итерацией; заданного числа итераций.

Первой строкой кода в MATLAB записывается минимизируемая нелинейная функция внутри цикла, имя которой присваивается переменной со свободным наименованием «F» [101]:

```
function F=myfunMOD14(x),
```

(4.9)

которая дополняется формулами с расчетом координат M точек, в которых по теории альтернансного метода сформируются температуры с абсолютным максимальным отклонением. Точки максимального отклонения температуры с ожидаемым расположением могут быть приравнены к константам.

В используемом алгоритме поиск координаты точки с максимальным отклонением осуществляется при помощи формулы (4.10), а затем полученное значение координаты округляется до целого числа командой «round»:

$$l1 = \text{round}((x(8) / (L/\text{Nodes})) + 1); . \quad (4.10)$$

Команды (4.9) и (4.10) дополняются описанными в разделе 4.2 командами для создания файлов, записи значений конструктивных и режимных параметров, используемых для расчета модели

```
fileID2=fopen('input2.txt', 'w'); %команда на открытие файла с
именем input2.txt;

fprintf(fileID2, '%10.6f\n', x(2)); %запись параметров из массива x (4.11)
в файл 'input2.txt' с установленным форматом числа;

fclose(fileID2); .
```

Далее алгоритм (4.9-4.11) дополняется командой запуска исполняемого файла программного пакета ANSYS (4.8) и расчета модели в свернутом режиме с предварительными настройками, которые подробно описаны в разделе 4.2. По завершении расчета модели формируются массивы данных.

Для решения задачи совместной оптимизации в постобработке численной модели добавлена команда, позволяющая формировать файл с построчной записью массива значений температур в каждом узле вдоль границы закаливаемого слоя, обновляющийся после каждого шага расчета модели. Чтение этого файла выполняется в ППП MATLAB при помощи команды:

$$\text{fileID7} = \text{fopen}(\text{'out_temperatures.dat'}, \text{'r'}); . \quad (4.12)$$

Загруженные данные из файла (4.12) представляют собой одномерный массив, который добавляется в рабочей области MATLAB с наименованием «A» в формате числа с фиксированной точкой [105]

$$\begin{aligned} A &= \text{fscanf}(\text{fileID7}, \text{'%f'}); \\ &\text{fclose}(\text{fileID7}); \end{aligned} \quad (4.13)$$

```
clear fileID7;.
```

Далее записывается команда с функцией «diff», согласно которой производится численное дифференцирование температурного распределения, собранного в массиве «A» (4.13) вида:

$$A1=diff(A); \quad (4.14)$$

Алгоритм (4.9) – (4.14) дополняется системой уравнений, составленной по альтернансному методу. Пример системы уравнений по альтернансному методу из используемого алгоритма представлен ниже:

$$F=[A(l_0)-Tdes+x(15); A(l_1)-Tdes-x(15); A(l_2)-Tdes+x(15); A(l_3)-Tdes-x(15); A(l_4)-Tdes+x(15); A(l_5)-Tdes-x(15); A(l_6)-Tdes+x(15); A(l_7)-Tdes-x(15)]; \quad (4.15)$$

$$A1(l_1)*100; A1(l_2)*100; A1(l_3)*100; A1(l_4)*100; A1(l_5)*100; A1(l_6)*100; A1(l_7)*100].$$

Нахождение вектора оптимальных значений искомых параметров обеспечивается с помощью стандартной функции MATLAB из набора Optimization Toolbox – «LSQnonlin», которая позволяет решить задачу поиска точки минимума некоторой целевой нелинейной функции $f(x)$ с ограничениями методом наименьших квадратов или подгонки кривой наименьших квадратов [27, 101]. Основная цель исполняемой функции – минимизация невязок, формирующихся в процессе решения системы уравнений (4.15), общий вид (3.17) которой представлен в разделе 3.2. При этом целевая функция формируется в виде:

$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x (f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2),$$

где в общем случае $f(x)$ – вектор-функция, x – вектор-столбец искомых переменных [101].

После системы уравнений алгоритм дополняется командами для создания специального файла – журнала значений аргументов оптимизации. В него записываются промежуточные значения параметров конструкции витков индуктора, сила тока индуктора и предельно допустимое отклонение $\varepsilon_{\min}^{(7)}$ после каждого расчета функции и конечные оптимальные значения параметров. Завершается функция командой «end».

Запуск оптимизационной процедуры осуществляется в командном окне, где согласно синтаксису исполняемой функции «LSQnonlin» задаются ограничения

аргументов оптимизации и заполняется вектор параметров X_0 с начальными приближениями [101].

«lb = [];» – нижняя граница значений оптимизируемых параметров;

«ub = [];» – верхняя граница значений оптимизируемых параметров;

«x0 = [];» – начальное приближение оптимизируемых параметров.

Дополнительно можно настроить опции, к которым относится отображение невязок в прогрессе расчета, число итераций, число вызовов функции, степень точности расчета и т.д. Опция 'DiffMinChange' – дает возможность вручную установить минимальное значение изменений оптимизируемых параметров функции. Пример набора исходных данных для запуска расчета приведен ниже:

```
lb=[1 5 1.6 1 0.01 0.21 0.01 13.5 5.189 10.9 18.1 27.9 34.01 38.1 45 5];
ub=[5 13 4 3.5 4 9 2.5 30 10.9 18.1 27.9 34.01 38.1 45 52.38 500];
x0=[3.241 9.735 2 1.874 0.34 6 1 16.3 7.681 15.729 24.093 29.803 36.773
    41.433 47.911 85];
options=optimoptions(@lsqnonlin,'Display','iter','DiffMinChange',0.0001)
[x,fval,resnorm,residual,exitflag,output,lambda]=lsqnonlin(@myfunMOD14, x0,
    lb, ub, options)
```

В ходе расчета оптимизации за одну итерацию выполняется число вызовов функции равное числу уравнений плюс один. Итого для задачи, например, с семью оптимизируемыми параметрами число вызовов функции будет равно семнадцати. Согласно тестовым расчетам для определения верного направления поиска решения достаточное количество итераций в среднем составляет 10 штук.

Для поиска управления на особом участке для каждого шага расчета модели создана специальная итерационная процедура с применением команд (4.9), (4.11) – (4.13), но на основе уравнения (3.4), которое в общем случае принимает вид:

$$I(P^{(N)}) = T_{\max}^{(P^{(N)})} - T_{\text{дон}} \rightarrow \min_{P^{(N)}}, \quad (4.16)$$

где $I(P^{(N)})$ - управление на особом участке, $T_{\max}^{(P^{(N)})}$ - максимальное значение температуры из массива.

В процессе поиска управления в отличие от решения задачи совместной оптимизации после расчета численной модели формируется массив значений температур с поверхностных слоев, а не только вдоль границы закаливаемого слоя. Далее происходит чтение массива в ППП MATLAB командой (4.12) и из него

определяется максимальное значение $T_{\max}^{(P^{(N)})}$. Далее $T_{\max}^{(P^{(N)})}$ поступает в расчет уравнения (4.16) где сравнивается с $T_{\text{дон}}$ и вычисляются невязки, для минимизации которых используется стандартная функция lsqnonlin ППП MATLAB [8, 10, 101].

4.4 Выводы по четвертой главе

1. Рассмотрена общая схема программного комплекса для реализации численных процедур: совместной оптимизации конструктивных и режимных характеристик индукционной нагревательной системы и поиска алгоритма управления для поверхностной закалки деталей сложной формы.

2. Описаны численные процедуры для решения задач совместной оптимизации и поиска алгоритма управления, сформулированные в третьей главе, которые реализованы в программном комплексе на основе ППП MATLAB с интеграцией нелинейной двумерной модели, разработанной в пакете ANSYS Mechanical APDL.

3. Подробно описаны команды для интеграции модели в оптимизационную процедуру, позволяющие выполнять обмен данными между ANSYS Mechanical APDL и MATLAB.

4. Решение системы трансцендентных уравнений, составленной на основе альтернансного метода и замкнутой относительно неизвестных параметров рассматриваемого процесса, реализовано с помощью стандартных функций, реализованных в MATLAB.

5. Разработанный программный комплекс может быть использован для реализации широкого круга оптимизационных процедур, позволяющих получить решение задач с интеграцией различных численных моделей.

6. Разработанные 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.

5. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

Постановка и общая методика решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева ответственных деталей сложной геометрической формы под поверхностную закалку на основе альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами рассмотрены в главе 3. Разработанная методика решения задачи совместной оптимизации включает проверку условий выполнения технологических ограничений на максимальную допустимую температуру и максимальные допустимые термонапряжения и решение нелинейной задачи управления на интервалах превышения указанных ограничений.

В данной 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 ступенчатой втулки по окончании стадии индукционного нагрева под закалку с учетом технологических ограничений на максимальную допустимую температуру и термические напряжения.

5.1 Решение задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений

В главе 2 разработан алгоритм построения осесимметричной двумерной модели процесса поверхностной индукционной закалки на стадиях нагрева и охлаждения в ППП ANSYS Mechanical APDL, описаны нелинейные теплофизические свойства материала заготовки. С помощью разработанной модели проведена серия тестовых расчетов взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе поверхностной закалки ступенчатых втулок из типовой углеродистой стали марки С40 без фасок с выступом от 6 до 9 мм; проанализировано влияние типовой конструкции витков индуктора и режимов работы индукционного нагревателя на распределение температуры в поверхностном слое угловой зоны. Результаты расчетов позволили

выявить конструктивные и режимные параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на изменение температурного распределения.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что при использовании типовой квадратной формы витков индуктора, представленной на рисунке 2.8, невозможно обеспечить требуемую равномерность нагрева закаливаемого поверхностного слоя стальной заготовки сложной формы ни при одном, ни при двух каналах управления. По этой причине предлагается перейти к более сложной геометрической форме второго витка индуктора для снижения отклонения температуры в угловой зоне заготовки [27].

Примеры результатов решения тестовых задач моделирования и оптимизации температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя при варьировании различных конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы представлены на рисунках 5.1, а-в. В серии тестовых задач использовались различные наборы конструктивных и режимных параметров нагревательной системы “индуктор заготовка” для:

- различных вариантов геометрии заготовок с угловой зоной без фасок (размеры выступа от 16 до 48 мм);
- различных вариантов конструктивного исполнения витка №2 сложной геометрической формы;
- различных вариантов конструктивного исполнения витков №1 и №3 прямоугольной формы (от 5 до 15 мм);
- различных расстояний между витками и заготовкой (от 0.5 до 5 мм);
- частоты тока индуктора от 30 до 200 кГц;
- силы тока индуктора от 800 до 2000 А;
- различного числа витков индуктора от 3 до 5.

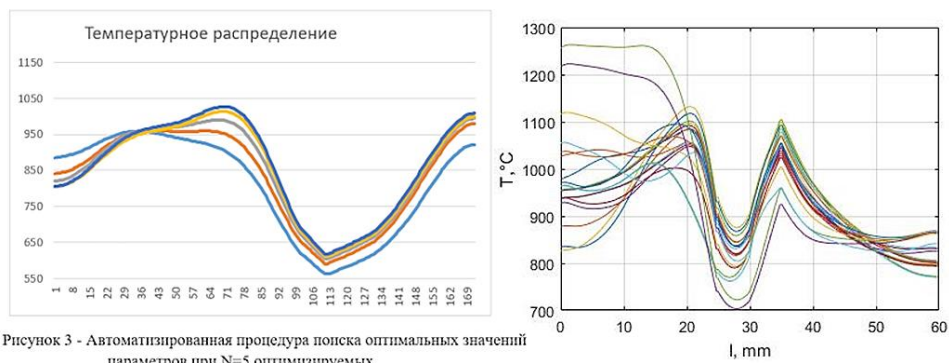


Рисунок 3 - Автоматизированная процедура поиска оптимальных значений параметров при N=5 оптимизируемых

а)

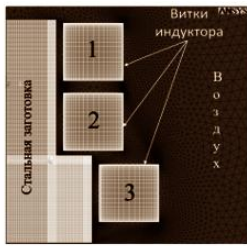


Рис.7 Начальный вид геометрии системы (ANSYS)

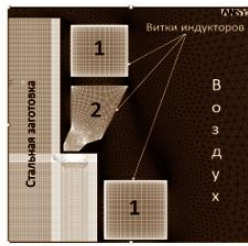


Рис.8 Модифицированная форма геометрии системы (ANSYS)

- Оптимизируемые параметры:
- P1 - расстояние между витком №1 и заготовкой
 - P2 - расстояние между витками 1 и 2
 - P3 - расстояние между витками 3 и заготовкой
 - P4 - расстояние между витками 3 и 2
 - I1(P5) - сила тока витков №1,3

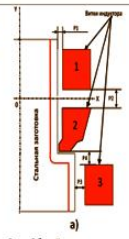


Рис. 3а - Общий вид индукционной нагревательной системы

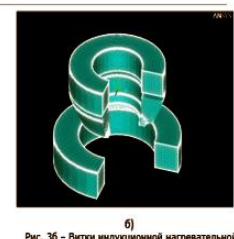


Рис. 3б - Витки индукционной нагревательной установки, полученные разверткой двумерного изображения (3/4 индуктора)

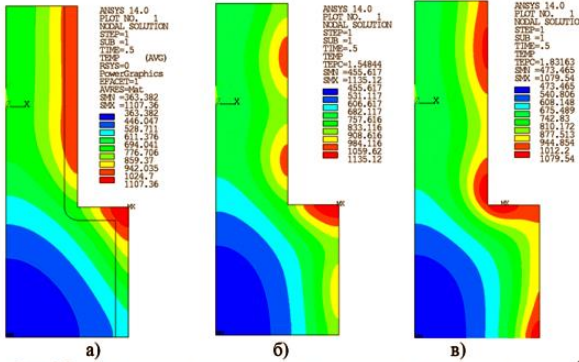
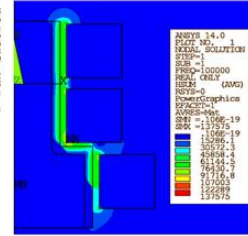
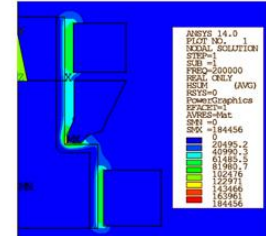


Рис. 8 Результатирующее распределение температуры в продольном сечении заготовки а) для параметров индуктора, представленных в табл.2 (строка 1); б) для параметров индуктора, представленных в табл.2 (строка 2); в) для оптимальных параметров индуктора

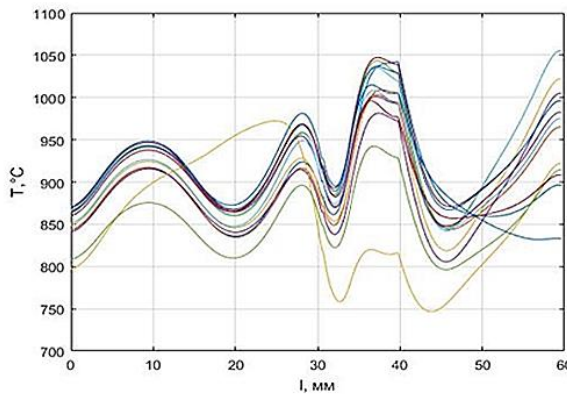


а)

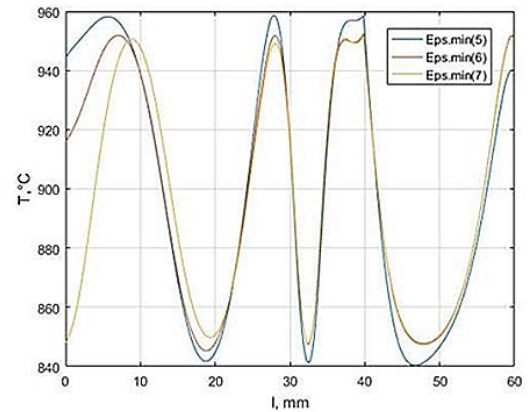


б)

Рис.10 Двумерное изображение осесимметричного электромагнитного поля, характеризующего интенсивность воздействия магнитного поля индуктора на заготовку в процессе нагрева, смоделированное в программном пакете ANSYS: А) 100кА и все витки квадратной формы, б) 200кА и витки №1 и 3 квадратной формы, а виток №2 сложной



б)



- Оптимизируемые параметры:
- P1-сторона квадратного витка №1,3,4,5
 - I1(P2)-сила тока витков №1,3,4,5
 - P3 - расстояние между витками 1 и 2
 - P4 - расстояние между витками 3 и 4, 4 и 5
 - P5 - расстояние между витками 3 и 2
 - I2(P6) - сила тока витков №2
 - P7 - расстояние между витком №1 и заготовкой
 - P8 - расстояние между витком №2 и заготовкой (по оси «X»)
 - P9 - расстояние между витком №2 и заготовкой (по оси «Y»)

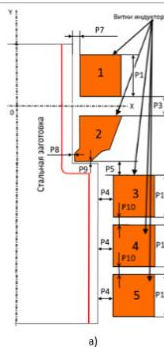


Рис. 13а - Общий вид индукционной нагревательной системы (вар. №2)

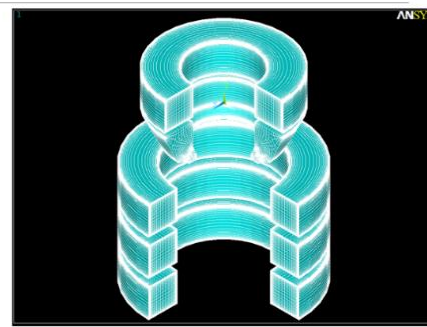


Рис. 13б - Витки индукционной нагревательной установки, полученные разверткой двумерного изображения (3/4 индуктора)

в)

а – численное моделирование и пробные оптимизационные расчеты;

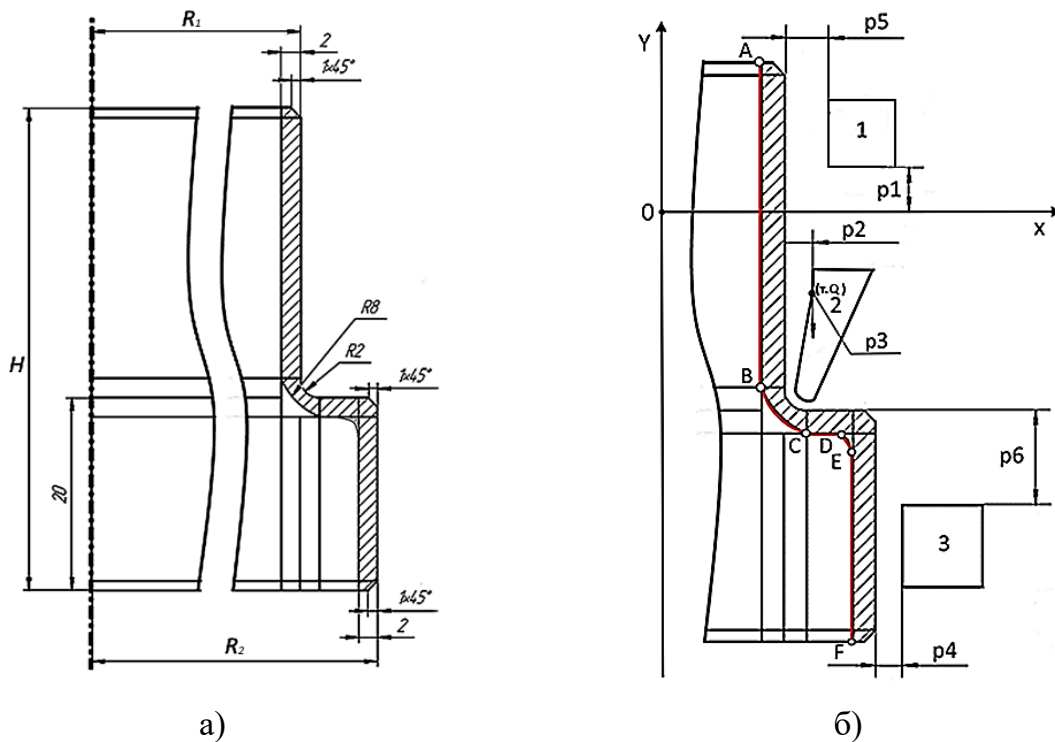
б – распределения температуры вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии

нагрева для $\epsilon_{\min}^{(5)}, \epsilon_{\min}^{(6)}, \epsilon_{\min}^{(7)}$; в – моделирование индуктора с пятью витками

Рисунок. 5.1 – Примеры результатов решения тестовых задач моделирования и оптимизации

Представленные в обобщенной форме тестовые оптимизационные расчеты выполнены для поиска решения при $\varepsilon_{\min}^{(5)}, \varepsilon_{\min}^{(6)}, \varepsilon_{\min}^{(7)}$ (рис. 5.1, б); в результате решения оптимизационных задач полученные отклонения температуры составили: $\varepsilon_{\min}^{(5)} = \pm 59^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{\min}^{(6)} = \pm 52^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{\min}^{(7)} = \pm 50^\circ\text{C}$. Температурное отклонение $\varepsilon_{\min}^{(5)}$ согласно (рис.2.9) превышает допустимое значение, поскольку при таком отклонении от требуемой температуры не образуется необходимая аустенитная микроструктура на стадии нагрева.

На основе анализа полученных результатов для снижения отклонения температуры в угловой зоне заготовки была предложена более сложная геометрическая форма второго витка индуктора с выступающей внешней частью. На рис. 5.2, а представлена геометрия системы «индуктор-заготовка» с витками сложной формы, где штриховкой показана область закаливаемого слоя. Рис. 5.2, б демонстрирует конструктивные особенности витков индуктора усложненной формы и их основные конструктивные параметры, оптимальные значения которых необходимо определить.



а – общий вид стальной заготовки; б – оптимизируемые параметры индуктора

Рисунок 5.2 – Осесимметричная двумерная модель системы «индуктор–заготовка»

Согласно методике, разработанной в главе 3 диссертации, на первом этапе решается задача совместной оптимизации конструктивных и режимных параметров индуктора для скоростного поверхностного нагрева под закалку без учета технологических ограничений, численное решение которой представлено в данном

разделе. Для решения задачи формируется вектор $P^{(6)}$ оптимизируемых конструктивных параметров витков индуктора (рис. 5.2, б), который включает следующие геометрические характеристики: p_1 – расстояние между витком 1 и координатой $Y=0$; p_2 – координата x точки Q витка №2; p_3 – y координата 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. В вектор режимных параметров $P^{(i)}$ предлагается включить параметр p_1 процесса, наиболее существенно влияющий на управление режимом нагрева – силу тока индуктора I .

Тогда расширенный вектор параметров в задаче совместной оптимизации может быть представлен как $P_{\Sigma}^{(7)} = (p_{\Sigma k})$, $k = \overline{1,7}$, а температурное распределение $T(x, y, t, P_{\Sigma}^{(7)})$, зависящее от суммарного вектора $P_{\Sigma}^{(7)}$ конструктивных и режимных параметров, представляет управляемую функцию состояния ОРП, где x, y – пространственные координаты, t – время.

Искомые параметры расширенного вектора $P_{\Sigma}^{(7)}$ стеснены ограничениями следующего вида:

$$\begin{aligned} 1 \leq p_{\Sigma 1} \leq 6; \quad 1 \leq p_{\Sigma 2} \leq 10; \quad 1 \leq p_{\Sigma 3} \leq 12; \quad 1 \leq p_{\Sigma 4} \leq 12; \\ 1 \leq p_{\Sigma 5} \leq 10; \quad 1 \leq p_{\Sigma 6} \leq 10; \quad 1500 \leq p_{\Sigma 7} \leq 2000. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Исходные данные для численного моделирования стадии нагрева, выполняемого в ППП ANSYS Mechanical APDL, представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для моделирования [26]

| № | Наименование параметра | Значение |
|----|---|--------------|
| 1. | Начальная температура заготовки, $T_a, ^\circ C$ | 20 |
| 2. | Длительность стадии индукционного нагрева, τ^0, c | 10 |
| 3. | Требуемая температура вдоль границы закаливаемого слоя, $T^*, ^\circ C$ | 900 |
| 4. | Высота заготовки $H, мм$ | 50 |
| 5. | Длина границы закаливаемого слоя ABCDEF стальной заготовки, $L, мм$ | ≈ 55 |
| 6. | Радиус заготовки $R1, мм$ | 40 |
| 7. | Радиус заготовки $R2, мм$ | 48 |
| 8. | Частота тока индуктора $f, кГц$ | 50 |
| 9. | Шаг расчета модели, c | 0,1 |

Для решения задачи совместной оптимизации используется критерий общего вида (3.2), который гарантирует минимальное абсолютное отклонение температурного распределения $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(7)})$ вдоль границы закаливаемого слоя от заданного значения T^* в конце стадии нагрева и для частного случая принимает вид:

$$I(P_{\Sigma}^{(7)}) = \max_{P_{\Sigma}^{(7)}} |T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(7)}) - T^*| \rightarrow \min.$$

Таким образом, задача совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индукционной нагревательной установки заключается в поиске значений параметров $P_{\Sigma opt}^{(7)} = (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, P_{\Sigma 3}^{opt}, P_{\Sigma 4}^{opt}, P_{\Sigma 5}^{opt}, P_{\Sigma 6}^{opt}, P_{\Sigma 7}^{opt})$, на которые наложены ограничения (5.1), обусловленные характеристиками нагревательной системы, которые за установленное время τ^0 обеспечат перевод объекта, описываемого нелинейной численной двумерной ANSYS моделью, из исходного состояния в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимизации (3.2) [27].

В представленном частном случае задача совместной оптимизации содержит семь оптимизируемых параметров ($N_{\Sigma}=7$). Согласно альтернативному методу, число точек, в которых достигаются предельные отклонения $\varepsilon_{\min}^{(7)}$ температуры $T(X, l, \tau^0, P_{\Sigma}^{(7)})$ от заданного значения T^* , должно быть на одну больше числа оптимизируемых параметров $M=N_{\Sigma}+1=8$. При этом, из физических соображений, очевидно, что в точке А (рис. 5.2, б) с координатой $l_1^{opt}=0$ будет достигаться температурный минимум.

Как указывалось ранее, для реализации процедуры оптимизации в качестве требуемого конечного состояния ОРП рассматривается температурное распределение вдоль пространственной границы ABCDEF закаливаемого слоя сложной геометрической формы, которую предлагается рассматривать как развертку по одной условной пространственной координате l , $l \in [0; L]$, где $L=|AB|+|BC|+|CD|+|DE|+|EF|$. Ожидаемое конечное распределение температуры $T(X, l_j, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(7)})$ вдоль границы упрочняемого слоя ABCDEF, соответствующее оптимальному распределению в конце стадии нагрева, представлено на рисунке 5.3.

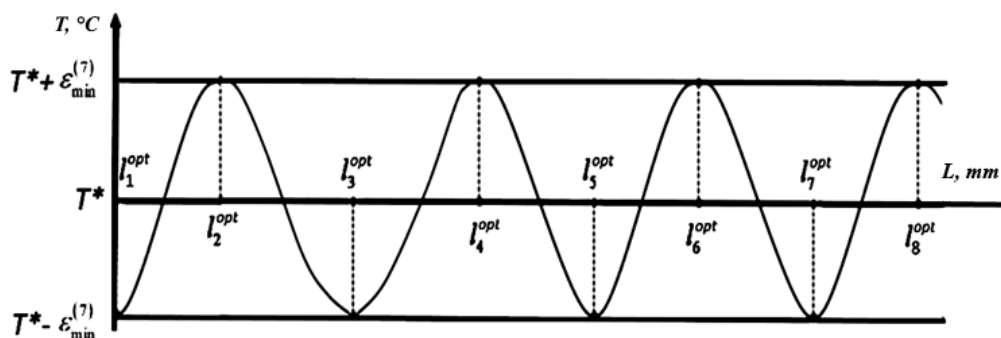


Рисунок 5.3 – Форма профиля оптимального конечного распределения температуры в задаче совместной оптимизации для $\varepsilon_{\min}^{(7)}$

Общая система уравнений (3.17) для решения сформулированной задачи совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индуктора для оптимального конечного распределения температуры $T(X, l_j, \tau^0, P_{\Sigma opt}^{(7)})$ для частного случая $\varepsilon_{\min}^{(7)}$, представленного на рис. 5.3, принимает вид:

$$\begin{aligned} T(X, \tau^0, l_j^{opt}, P_{\Sigma opt}^{(7)}) - T^* &= (-1)^j \psi \varepsilon_{\min}^{(7)} \quad j = 1, 8; \psi = \pm 1; \\ P_{\Sigma opt}^{(7)} &= (P_{\Sigma 1}^{opt}, P_{\Sigma 2}^{opt}, P_{\Sigma 3}^{opt}, P_{\Sigma 4}^{opt}, P_{\Sigma 5}^{opt}, P_{\Sigma 6}^{opt}, P_{\Sigma 7}^{opt}) \\ 0 &= l_1^{opt} < l_2^{opt} < l_3^{opt} < l_4^{opt} < l_5^{opt} < l_6^{opt} < l_7^{opt} < l_8^{opt} \leq L; \\ \frac{\partial T(X, \tau^0, l_m^{opt}, P_{\Sigma opt}^{(7)}) - T^*}{\partial l} &= 0; \quad m = 2, 8, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $l_1^{opt} = 0$ соответствует точке А на верхнем торце заготовки (рис. 5.2, 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 максимально достижимой точности нагрева в задаче оптимизации при $N_{\Sigma} = 7$.

Система (5.2) включает 15 уравнений, замкнутых относительно 15 неизвестных параметров: 7 оптимизируемых параметров, входящих в вектор $P_{\Sigma opt}^{N_{\Sigma}}$, 7 координат точек экстремума $l_j^{opt}, j = \overline{2, 8}$, с максимальным отклонением температуры, и величину максимального абсолютного отклонения $\varepsilon_{\min}^{(7)}$ температуры вдоль границы закаливаемого слоя от заданного значения. Значения температуры $T(X, \tau^0, l_j^{opt}, P_{\Sigma opt}^{(7)})$ в точках $l_j^{opt}, j = \overline{2, 8}$, рассчитываются с помощью численной модели, разработанной в ANSYS.

В среднем поиск решения задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений с указанными условиями составляет 15-20 итераций, которые рассчитываются примерно 72 часа. Полученные оптимальные значения параметров в результате численного решения представлены в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2 – Оптимальные значения параметров без учета фазового ограничения 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 ε , °С |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Оптимальное значение | 4.5 | 1.8 | 10.1 | 2.7 | 3 | 9.5 | 1584.9 | 40.8 |

Таблица 5.3 – 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 |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Конечные координаты | 7,9 | 15,9 | 24,4 | 28,4 | 37 | 42,1 | 52,3 |

Температурное распределение в конечный момент времени нагрева вдоль границы закаливаемого слоя после решения задачи совместной оптимизации без учета фазовых ограничений представлено на рисунке 5.4.

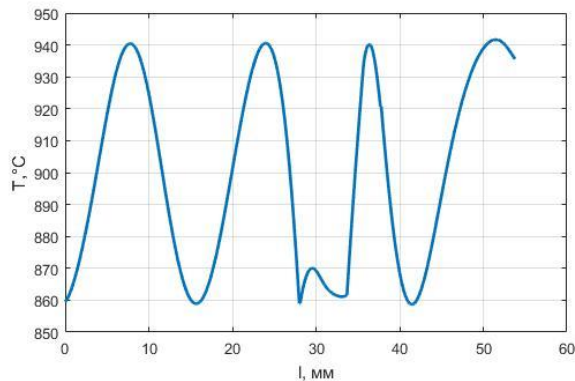
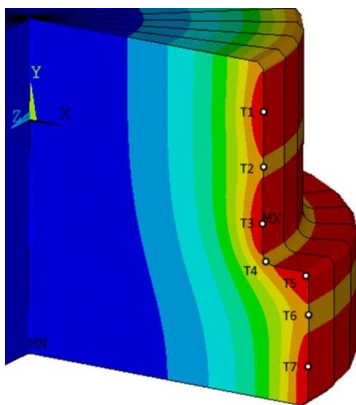
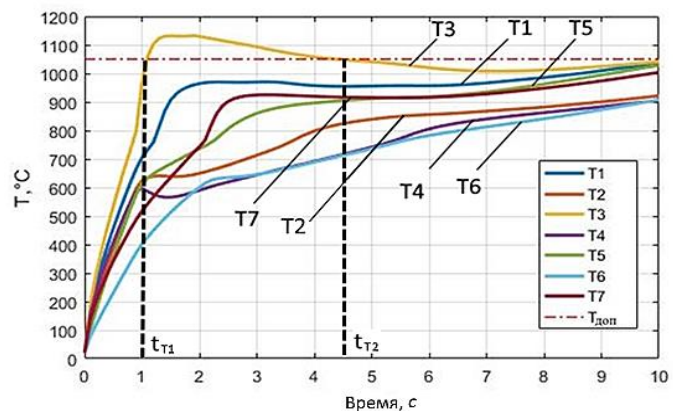


Рисунок 5.4 – Распределение температур вдоль границы закаливаемого слоя ABCDEF в конце стадии индукционного нагрева

Для анализа изменений температур в процессе нагрева выбраны характерные точки, показанные на рисунках. 5.5, а и 5.6, а. На первом этапе решения задачи совместной оптимизации согласно методике, представленной в разделе 3.1, не учитывались ограничения (3.3) на максимальную допустимую температуру, поэтому для проверки выполнения этого ограничения исследуется изменение температуры в характерных точках в процессе нагрева с найденными оптимальными параметрами, в которых с наибольшей степенью вероятности может возникнуть перегрев. История изменения температуры в характерных точках на стадии нагрева представлена на рис. 5.5, б и 5.6, б.



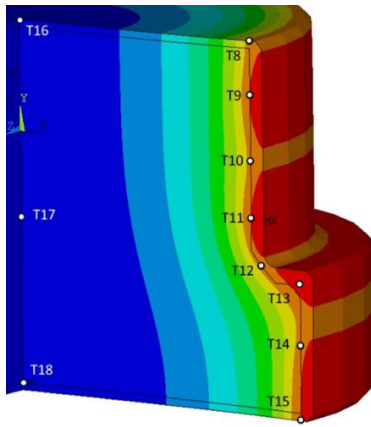
а)



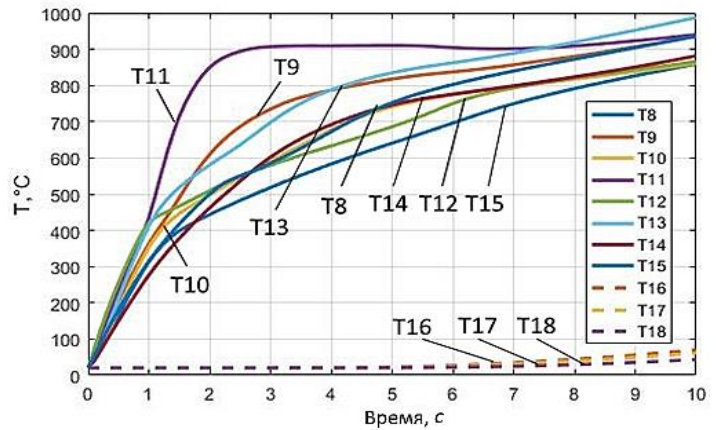
б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени в точках на поверхности заготовки

Рисунок 5.5 – Результаты решения задачи совместной оптимизации без учета фазового ограничения на максимальную допустимую температуру (3.3)



а)



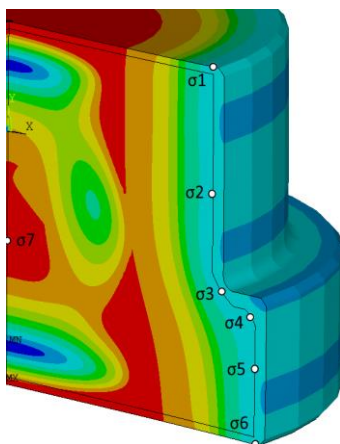
б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки

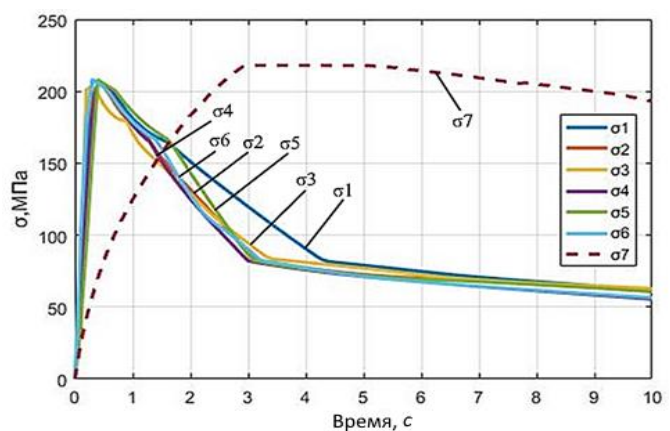
Рисунок 5.6 – Результаты решения задачи совместной оптимизации без учета фазового ограничения на максимальную допустимую температуру (3.3)

В рассматриваемом оптимальном процессе температура в точке Т3, находящейся вблизи угловой зоны на поверхности заготовки, через 1 с после начала нагрева превысила установленное технологическое ограничение $T_{\text{доп}} = 1050^{\circ}\text{C}$, достигла 1130°C и к 4.5 секунде опустилась ниже ограничения. В характерных точках Т4 и Т12 температура превысила границу начала формирования аустенитного превращения (рис. 2.9), что в дальнейшем, при достаточной скорости охлаждения, позволит сформировать мартенситную микроструктуру.

Исследование стадии индукционного нагрева сопровождается анализом эквивалентных напряжений по Мизесу в характерных точках, результаты расчета которых представлены на рисунке 5.7.



а)

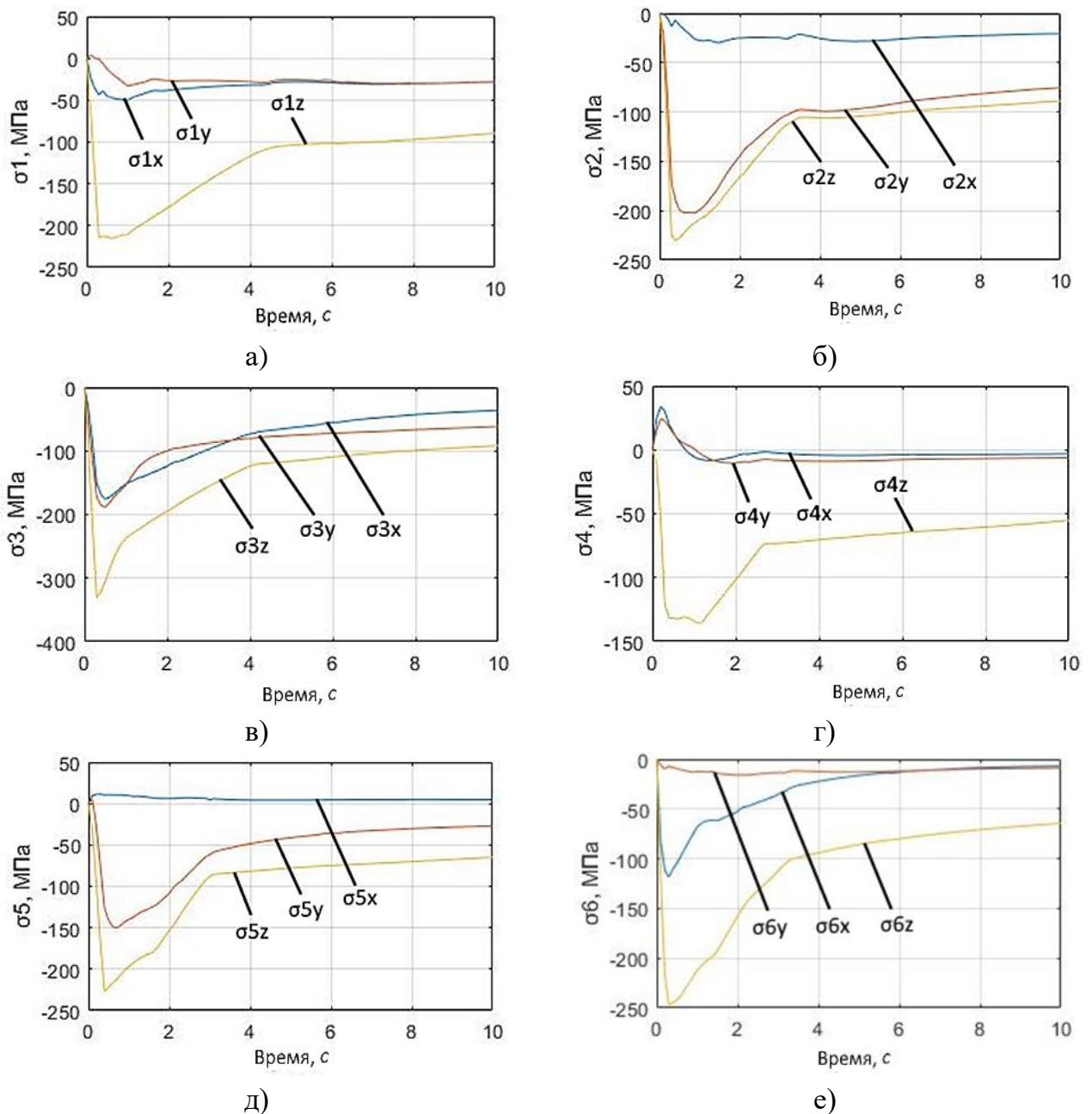


б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость термических напряжений в характерных точках от времени

Рисунок 5.7 – Эквивалентные термические напряжения по Мизесу в характерных точках на стадии нагрева без учета ограничений

В начале нагрева наибольшие значения растягивающих напряжений наблюдаются в поверхностном закаливаемом слое заготовки в точках $\sigma 1$ – $\sigma 6$, при этом со временем напряжения $\sigma 1$ – $\sigma 6$ начинают уменьшаться. Напротив, напряжения в точке $\sigma 7$ центра заготовки становятся сжимающими и увеличиваются до значений, сопоставимых с теми, что были в поверхностном слое в начале нагрева [26]. Проанализированы результаты расчета осевых компонент термических напряжений в характерных точках (рис. 5.8) и произведена проверка выполнения ограничения (3.5) по пределу текучести.



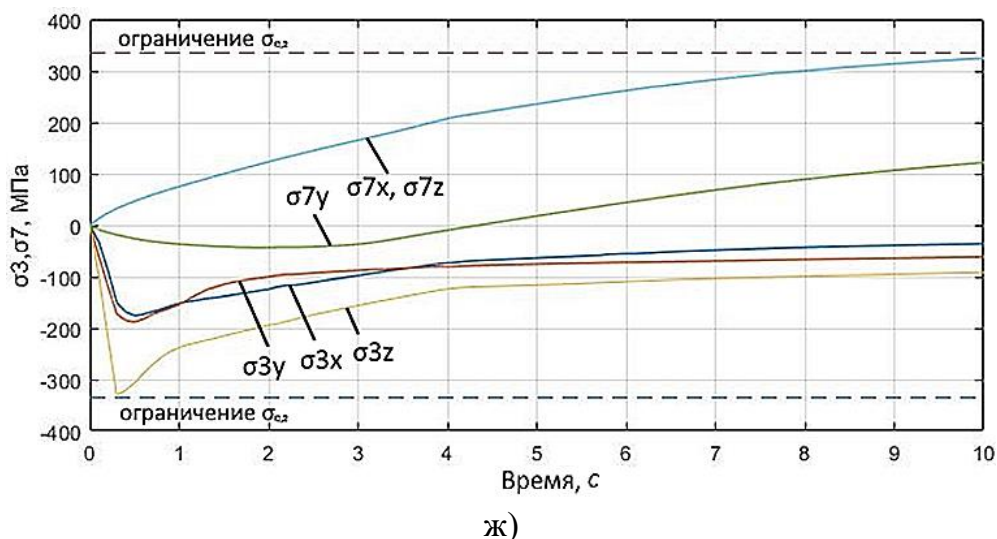


Рисунок 5.8 – Компоненты осевых термических напряжений заготовки в процессе нагрева в точках $\sigma 1 - \sigma 7$ (а-ж)

Наибольшие термические напряжения выявлены по компонентам осевых напряжений в точках $\sigma 3$ и $\sigma 7$. В этих точках значения термических напряжений приближаются к пределу текучести материала, который составляет не менее 335 МПа по ГОСТ 1050–2013 для стали 40. В точке $\sigma 3$, находящейся в угловой области вблизи поверхности заготовки, наибольшие термические напряжения появляются в начале стадии нагрева, а в расположенной в центре точке $\sigma 7$ – в конце [26]. Максимальное значение термонапряжений в ходе всего процесса не превышает предела прочности, который составляет для стали 40 не менее 570 МПа [26].

Согласно методике, разработанной в главе 3 (раздел 3.1), проблема локального перегрева поверхности заготовки может быть устранена при помощи перехода к решению нелинейной задачи поиска управления из условия (3.4) на участке движения по ограничению (3.3) на максимальную допустимую температуру поверхности $T_{дон}$ (раздел 3.3).

5.2 Решение задачи управления на интервалах движения по ограничениям

В данном разделе рассматривается численное решение задачи поиска управления током индуктора на временном интервале движения по фазовому ограничению на максимальную допустимую температуру (3.3).

При анализе решения задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений определено (рис. 5.5, б), что в интервале с 1 по 4.5 секунду температура заготовки превышает максимальное допустимое значение $T_{дон}$, т.е. нарушается

ограничение (3.3). Это вызывает необходимость поиска такого управления, при котором температура на особом участке не будет превышать ограничение $T_{дон}$.

В разделе 3.3 представлена общая методика численного решения задачи управления на временных интервалах движения по фазовому ограничению, согласно которой алгоритм управления током индуктора с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру (3.3) примет вид, подобный (3.21) [8, 14]:

$$I(t) = \begin{cases} I_{opt}, t \in [0, t_1]; \\ I_{OY}(t), t \in [t_1, t_2]; \\ I_{opt}, t \in [t_2, \tau^0]. \end{cases} \quad (5.3)$$

В выражении (5.3) t_1 – момент выхода максимальной температуры заготовки на ограничение $T_{дон}$, значение силы тока индуктора для которого находится в ходе итерационного уменьшения невязки уравнения (4.16); t_2 – момент окончания движения по ограничению; $I_{opt} = p_{\Sigma 7}^{opt} = const$ – значение тока индуктора, полученное в результате решения задачи совместной оптимизации без учета ограничений; $I_{OY}(t) = U^{opt}(t) = const$ в (3.21) – управление на участке движения по ограничению. Поиск управляющего воздействия $I_{OY}(t)$ представляет собой последовательный расчет значений силы тока на каждом временном шаге длительностью 0.1 с, основанный на выполнении условия (3.4). Для реализации поиска значений силы тока индуктора на участке движения по ограничению используется разработанная в диссертации численная процедура (рис 4.1) минимизации функционала вида (раздел 4.3):

$$I(P^{(1)}) = T_{\max}^{(P^{(1)})} - T_{дон} \rightarrow \min_{P^{(1)}}. \quad (5.4)$$

При решении задачи поиска управления значения конструктивных характеристик нагревателя приняты равными оптимальным значениям, которые получены в результате решения задачи совместной оптимизации без учета технологических ограничений и показаны в таблице 5.2.

Полученный в результате решения задачи алгоритм управления током индуктора на стадии нагрева для задачи с фазовым ограничением на максимальную допустимую температуру $T_{дон}$ для случая одного участка движения по ограничению принимает вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1584.9 \text{ A}, & t \in [0, 1]; \\ I_{ov}(t), & t \in (1, 4.5); \\ 1584.9 \text{ A}, & t \in [4.5, 10]. \end{cases} \quad (5.5)$$

Результат решения задачи поиска алгоритма управления с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру представлен на рисунке 5.9.

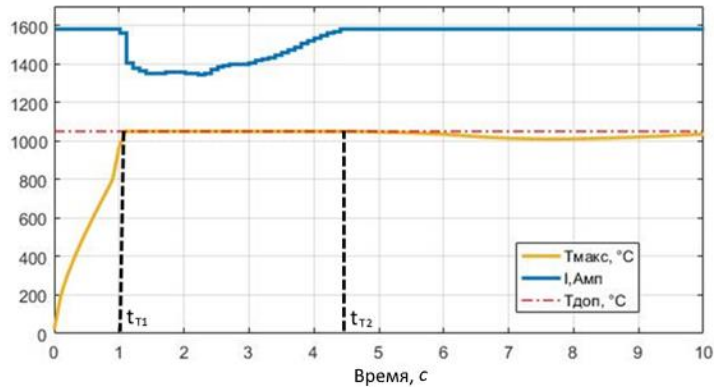


Рисунок 5.9 – Максимальное значение температуры заготовки и алгоритм управления током индуктора на стадии нагрева

На особом участке (t_{T1} , t_{T2}) ступенчатое изменение значений силы тока индуктора позволяет обеспечить режим нагрева, при котором максимальная температура заготовки не превышает допустимое значение. При этом введение интервала движения по ограничению приводит к увеличению неравномерности конечного температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева, что в дальнейшем может привести к ухудшению качества мартенситной микроструктуры в отдельных зонах изделия и к невозможности ее формирования в нижней части детали (рис. 2.9). Итоговое температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева при управляющем воздействии (5.5) представлено на рисунке 5.10.

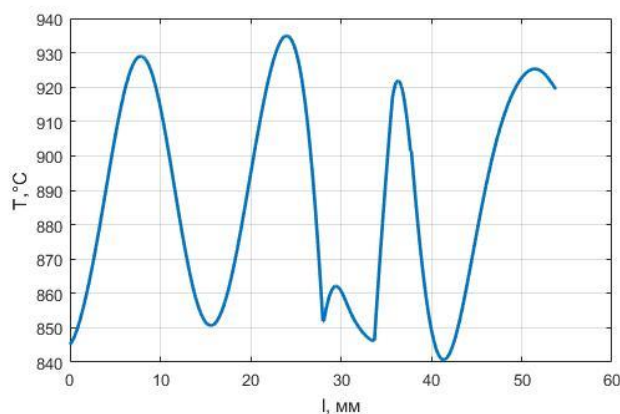
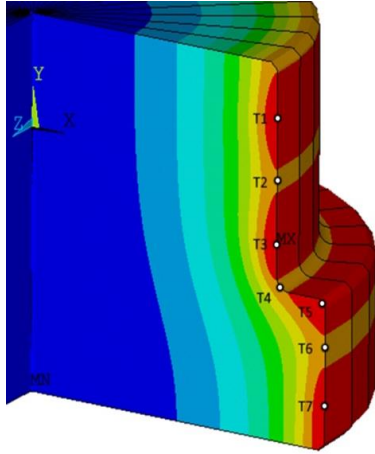
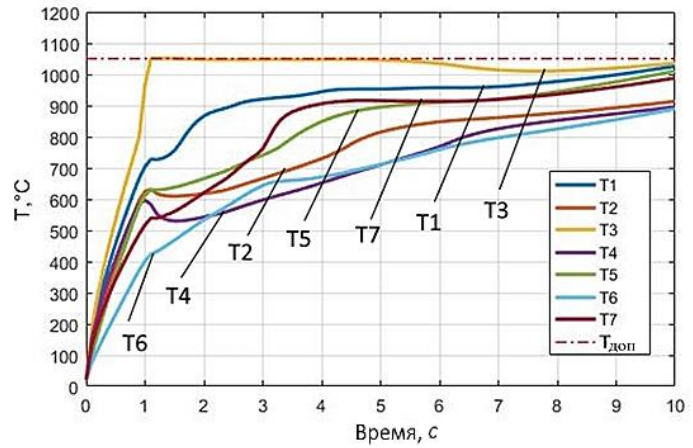


Рисунок 5.10 – Распределение температур вдоль границы закаливаемого слоя ABCDEF в конце стадии индукционного нагрева при управлении (5.5)

Рассчитанные температуры в семи характерных точках на поверхности заготовки с учетом параметров, полученных после решения задачи совместной оптимизации при учете управляющего воздействия на интервале движения по ограничению (1 – 4.5 с) представлены на рисунке 5.11.



а)

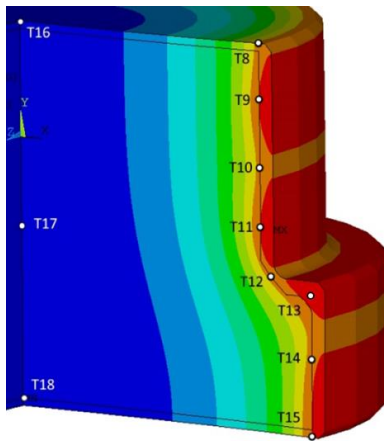


б)

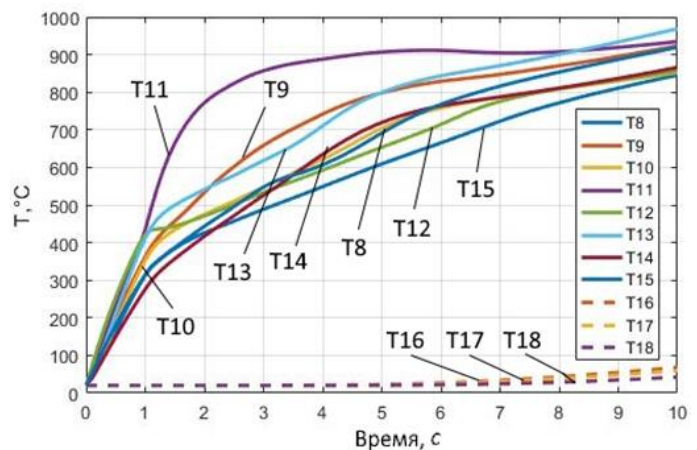
а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени в характерных точках на поверхности заготовки

Рисунок 5.11 – Результаты решения задачи совместной оптимизации с учетом управляющего воздействия на особом участке

Рассчитанные температуры в одиннадцати характерных точках вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки представлены на рисунке 5.12.



а)



б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки

Рисунок 5.12 – Результаты решения задачи совместной оптимизации с учетом управляющего воздействия на особом участке

Как было отмечено ранее, введение особого участка движения по ограничению приводит к увеличению неравномерности температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева (рис. 5.10). Согласно методике, разработанной в главе 3 (рис. 3.1), для повышения равномерности температурного распределения выполняется повторное решение задачи совместной параметрической оптимизации с учетом алгоритма управления на особом участке движения по ограничению (3.3).

5.3 Решение задачи совместной параметрической оптимизации с учетом технологических ограничений

Повторное решение задачи совместной оптимизации основывается на полученном в разделе 5.1 решении задачи совместной параметрической оптимизации конструкции витков и алгоритмов управления индуктором для поверхностного нагрева под индукционную закалку стальных заготовок сложной формы с учетом найденного в разделе 5.2 управляющего воздействия на участке движения по ограничению на максимально допустимую температуру. Целью повторного решения задачи совместной оптимизации является улучшение равномерности температурного распределения по границе закаливаемого слоя с учетом технологического ограничения, за счет уточнения значений параметров конструкции индуктора и режимов его работы.

В момент окончания участка движения по ограничению наблюдается снижение температуры ниже $T_{\text{доп}}$ вследствие нескольких одновременно действующих факторов: изменение физических свойств стали с ростом температуры в процессе нагрева; выравнивание температуры по сечению за счет теплопроводности; наличие потерь теплоты с поверхности при интенсивном индукционном нагреве за счет излучения и конвективного теплообмена. Поэтому предлагается повторно решить задачу совместной оптимизации с тем же набором оптимизируемых параметров, но с уточнением силы тока индуктора (параметр $p_{\Sigma 7}$) не на всем протяжении процесса нагрева, а на интервале с 4.5 до 10 секунды, где свойства стали в поверхностном слое уже претерпели значимые изменения и практически не меняются. Система 15-ти уравнений с семью оптимизируемыми параметрами для решения этой задачи аналогична системе уравнений (5.2).

На каждый оптимизируемый параметр наложены ограничения вида (5.6):

$$1 \leq p_{\Sigma 1} \leq 6; 1 \leq p_{\Sigma 2} \leq 10; 1 \leq p_{\Sigma 3} \leq 9; 1 \leq p_{\Sigma 4} \leq 9; \\ 1 \leq p_{\Sigma 5} \leq 12; 1 \leq p_{\Sigma 6} \leq 12; 1500 \leq p_{\Sigma 7} \leq 1700; \quad (5.6)$$

В результате решения задачи совместной оптимизации получены оптимальные значения параметров, которые представлены в таблицах 5.4 и 5.5.

Таблица 5.4 – Оптимальные значения параметров с учетом фазового ограничения на максимальную допустимую температуру

| Параметр | $P_{\Sigma 1}^{\text{opt}}$, мм | $P_{\Sigma 2}^{\text{opt}}$, мм | $P_{\Sigma 3}^{\text{opt}}$, мм | $P_{\Sigma 4}^{\text{opt}}$, мм | $P_{\Sigma 5}^{\text{opt}}$, мм | $P_{\Sigma 6}^{\text{opt}}$, мм | $P_{\Sigma 7}^{\text{opt}}$, А | Отклонение ϵ , °С |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Исходные | 4.5 | 1.8 | 10.1 | 2.7 | 3 | 9.5 | 1584.9 | 40.8 |
| Оптимальное значение | 4.5 | 1.7 | 8.8 | 2.6 | 3.1 | 9.4 | 1612.1 | 40.6 |

Таблица 5.5 – 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 |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Исходные | 7,8 | 15,9 | 24,3 | 28,4 | 37,0 | 42,1 | 52,3 |
| Оптимальные | 7.9 | 15.9 | 24.4 | 28.4 | 36.9 | 42 | 51.8 |

Полученный в результате решения задачи алгоритм управления током индуктора на стадии нагрева для задачи с фазовым ограничением на максимальную допустимую температуру $T_{\text{дон}}$ для случая одного участка движения по ограничению принимает вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1584.9A, t \in [0, 1); \\ I_{\text{ov}}(t), t \in [1, 4.5]; \\ 1612.1A, t \in (4.5, 10], \end{cases} \quad (5.7)$$

где $I_{\text{ov}}(t)$ имеет вид, представленный на рис. 5.13 (кривая I_2). Сравнение алгоритмов управления током индуктора, полученных до и после повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения (3.3), представлено на рисунке 5.13.

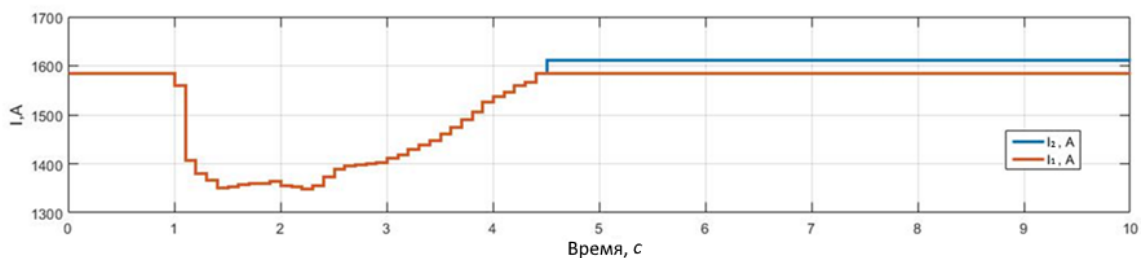


Рисунок 5.13 – Сравнение алгоритмов управления током индуктора с учетом технологического ограничения (3.3), где I_1 – управление до решения задачи совместной оптимизации; I_2 – управление после решения задачи совместной оптимизации

Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя в конечный момент времени нагрева после повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения на максимальную допустимую температуру (3.3) представлено на рисунке 5.14.

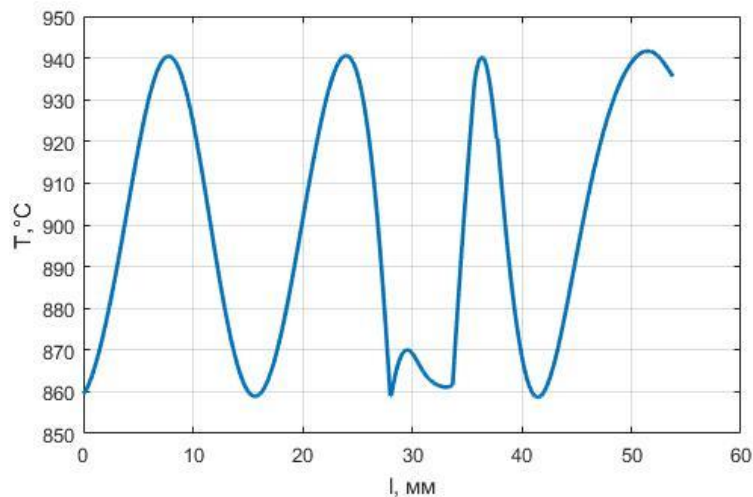
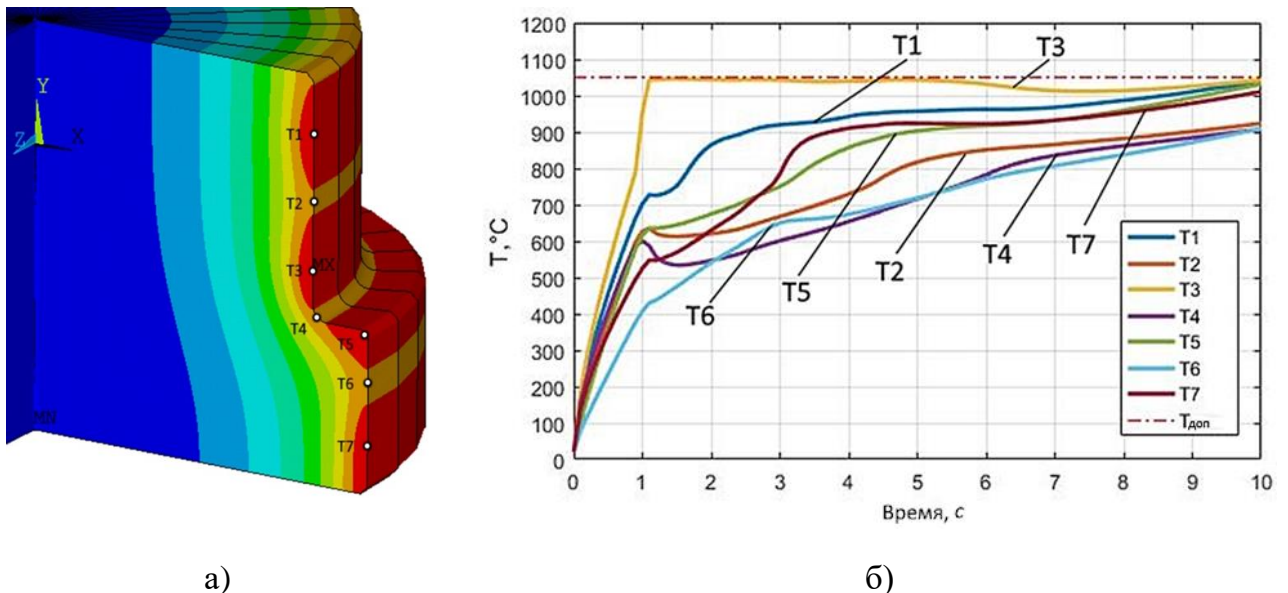


Рисунок 5.14 – Распределение температур вдоль границы закаливаемого слоя ABCDEF в конце стадии индукционного нагрева после повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом ограничения (3.3)

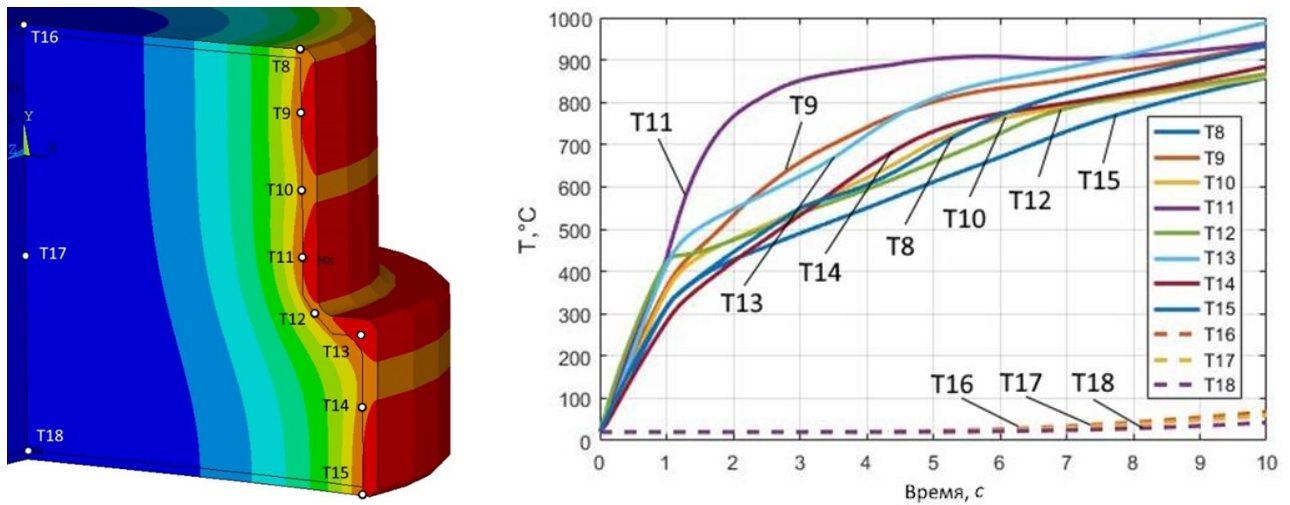
Рассчитанные температуры на стадии нагрева в семи характерных точках на поверхности заготовки представлены на рисунке 5.15.



а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени в точках на поверхности заготовки

Рисунок 5.15 – Результаты повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения (3.3)

Рассчитанные температуры в 11 точках вдоль границы закаливаемого слоя, а также в центре заготовки после повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом ограничения на максимальную допустимую температуру представлены на рисунке 5.16.



а)

б)

а – расположение характерных точек; б – зависимость температуры от времени вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки

Рисунок 5.16 – Результаты повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения (3.3)

Итоговое температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева с учетом управления (5.7) в сравнении с температурным распределением, полученным при использовании управления (5.5), показано на рисунке 5.17.

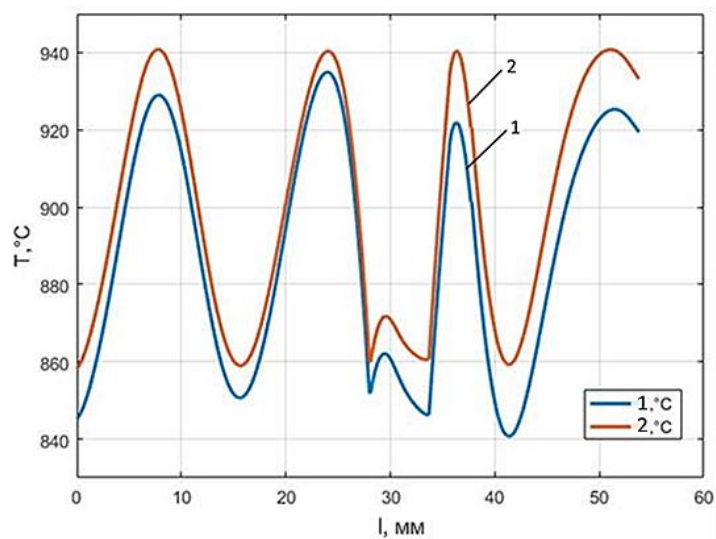
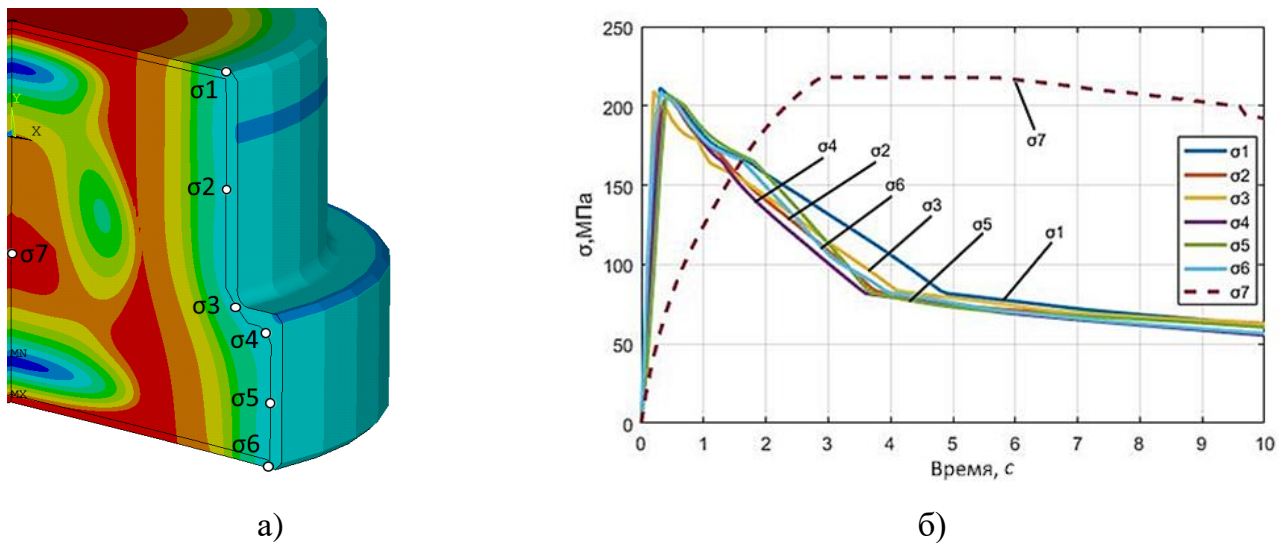


Рисунок 5.17 – Температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя до (1) и после (2) повторного решения задачи совместной оптимизации с ограничением (3.3)

Анализ результатов повторного решения задачи совместной оптимизации подтверждает, что в процессе нагрева не нарушаются технологические ограничения на максимальную допустимую температуру (3.3), а полученные абсолютные значения отклонений конечной температуры от заданной не превышают значения в $40,6^{\circ}\text{C}$.

Анализ диаграммы (рис. 2.9) позволяет сделать вывод, что полученное абсолютное отклонение температуры находится в диапазоне формирования аустенитной микроструктуры, ограниченном кривой АС3. Это свидетельствует о том, что 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 технологическим требованиям.

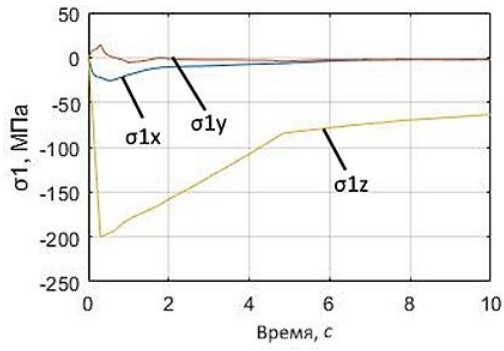
Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу в процессе индукционного нагрева представлены на рис. 5.18. Анализ итоговых результатов термических напряжений на стадии индукционного нагрева показал, что и ограничение по термическим напряжениям (3.5) (по пределу упругости) не нарушается.



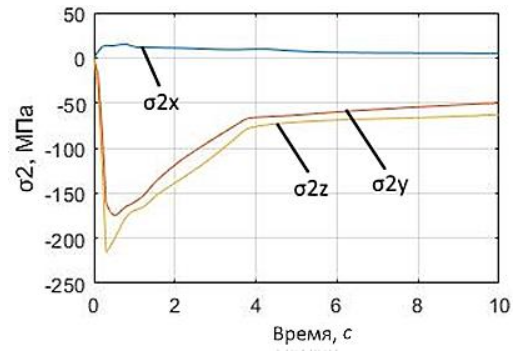
а – расположение характерных точек; б – эквивалентные термические напряжения в характерных точках вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки

Рисунок 5.18 – Термические напряжения по Мизесу на стадии нагрева в характерных точках после повторного решения задачи совместной оптимизации с ограничением (3.3)

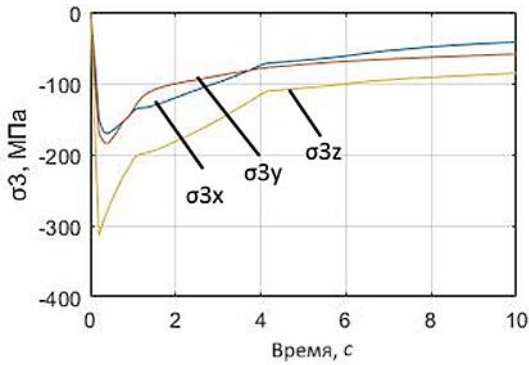
Осевые компоненты напряжений в характерных точках представлены на рис. 5.19.



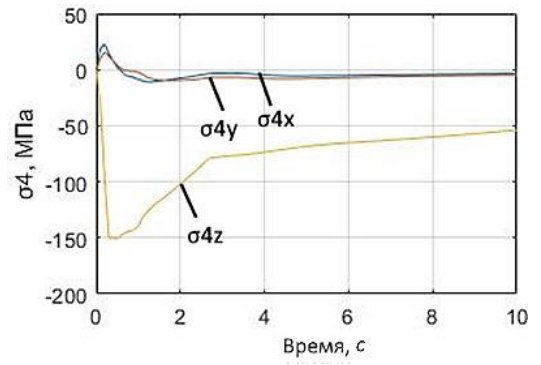
а)



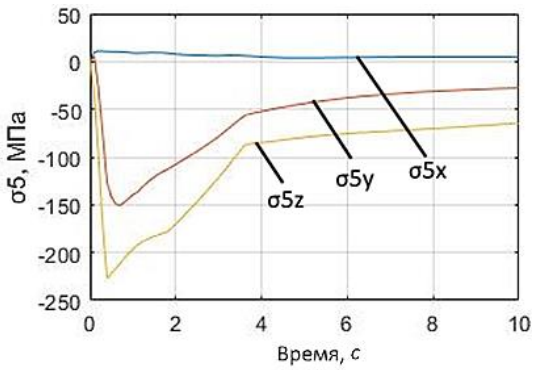
б)



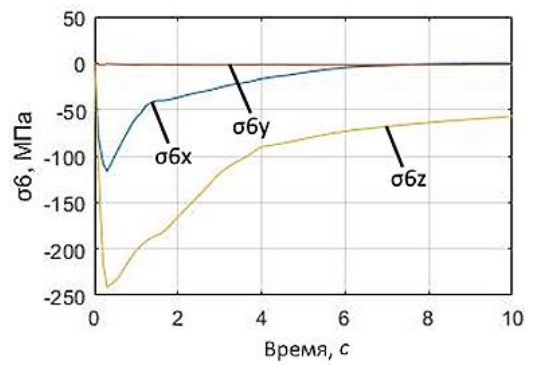
в)



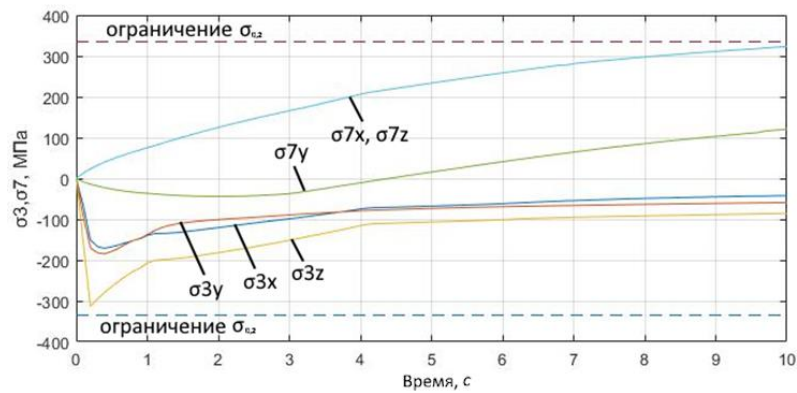
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 5.19 – Осевые компоненты напряжений в процессе нагрева в характерных точках $\sigma_1 - \sigma_7$ (а-ж) после решения задачи совместной оптимизации с учетом ограничения (3.3)

Термические напряжения после повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом фазового ограничения на максимальную допустимую температуру не превышают предел упругости в 335 МПа. Необходимость поиска алгоритма управления с учетом фазового ограничения по термическим напряжениям отсутствует.

На рисунке 5.20. представлены результаты моделирования температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева для номенклатуры деталей с длиной выступа 7, 7.5, 8 мм. Как показывает анализ, при изменении длины выступа в указанных пределах значения температуры в конце стадии нагрева вдоль границы закаливаемого слоя не опускаются ниже предельного значения, при котором происходит начало формирования аустенитной микроструктуры. Таким образом, даже при существенных изменениях радиуса выступа в указанных диапазонах, найденные конструктивные и режимные параметры можно считать оптимальными.

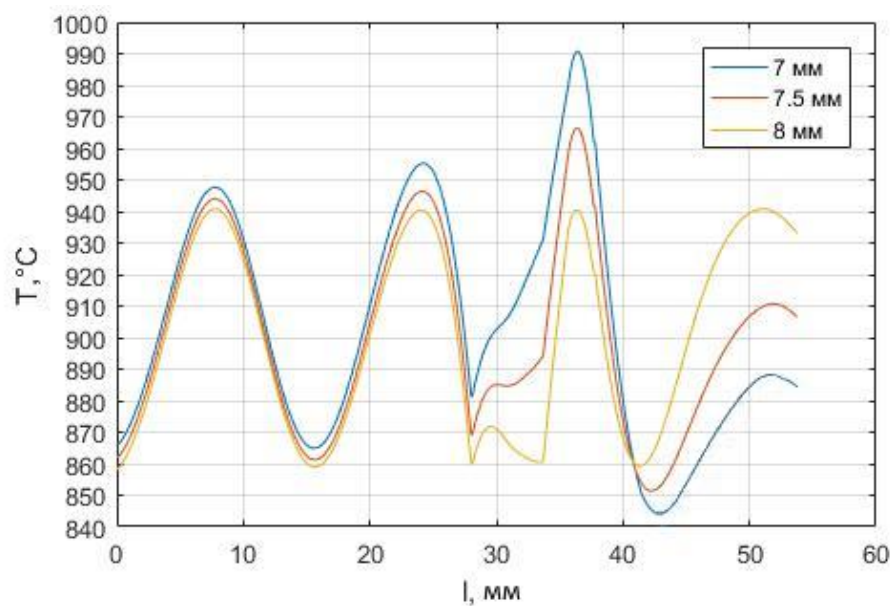


Рисунок 5.20 – Изменение температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя в зависимости от величины выступа

Выполнен итоговый анализ тепловых полей и полей термических напряжений на стадии нагрева и на стадии охлаждения. Для расчета стадии охлаждения использовалось конечное температурное распределение, полученное при повторном расчете задачи совместной оптимизации, с параметрами, указанными в разделе 5.3. Результат расчета температур в характерных точках представлен на рисунке 5.21.

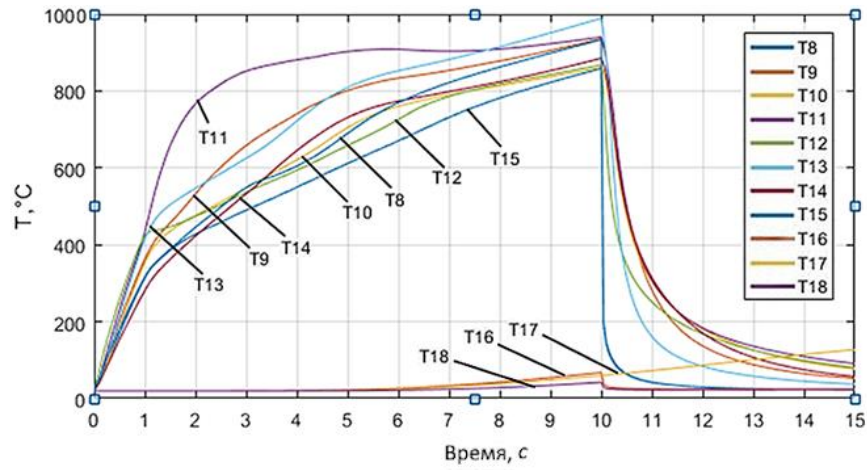
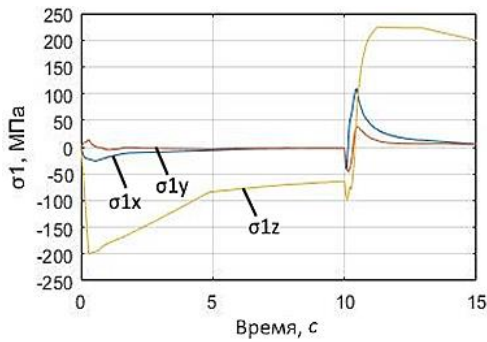
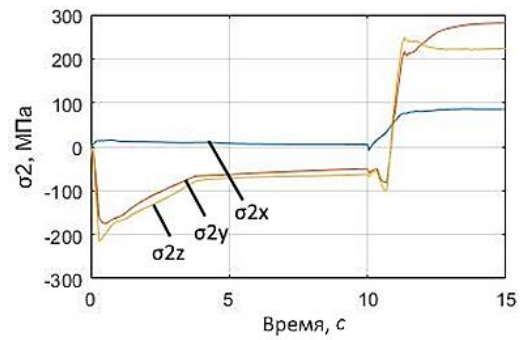


Рисунок 5.21 – Зависимость температуры от времени в характерных точках вблизи границы закаливаемого слоя и в центре заготовки на стадии нагрева и охлаждения

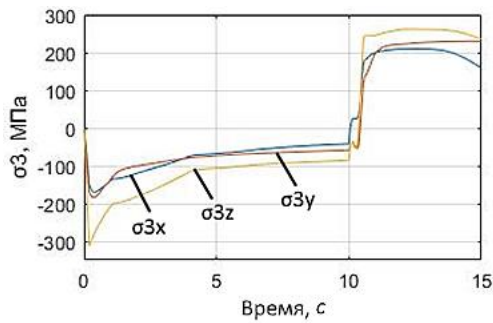
Результаты расчета осевых компонент термических напряжений представлены на рисунках 5.22.



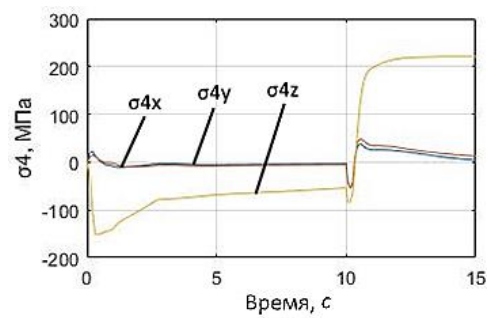
а)



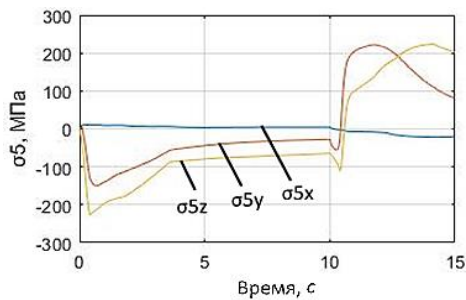
б)



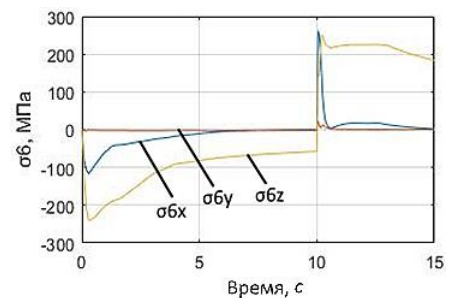
в)



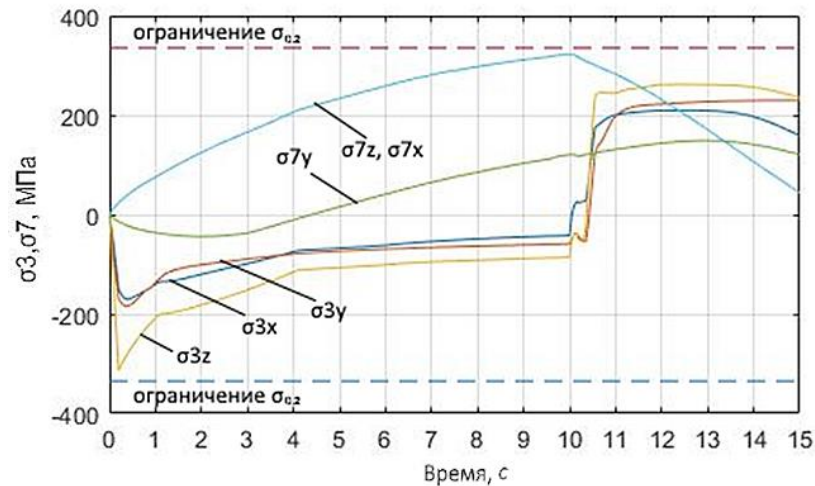
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 5.23 – Осевые компоненты термических напряжений в т. $\sigma_1 - \sigma_7$ (а-ж) после решения задачи совместной оптимизации с учетом фазового ограничения (3.3)

Анализ результатов моделирования тепловых полей и полей термических напряжений на стадии оптимального нагрева с учетом фазового ограничения (3.3) и охлаждения при указанных исходных данных показал отсутствие нарушения ограничений по температуре и термическим напряжениям.

Решение задачи совместной оптимизации с учетом найденного управления на участке движения по ограничению на максимально допустимую температуру позволяет нагреть представленную заготовку максимально равномерно и без локальных перегревов поверхности. Согласно диаграмме аустенитного превращения (рис. 2.9) для аналогичной стали марки С45 максимальное абсолютное значение температурного отклонения 40.6°C находится в интервале температур выше линии АС3, определяющей границу формирования аустенитной микроструктуры. Это свидетельствует о том, что 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 технологическим требованиям.

5.4. Программная и техническая реализация алгоритма управления процессом поверхностного индукционного нагрева под закалку

Для программной реализации найденного в разделе 5.3 алгоритма управления с помощью программируемого контроллера выбран пакет CoDeSys v2.3.9 [102]. Данное

программное решение обладает разнообразным набором функций для визуализации операторских панелей в графическом интерфейсе, а также обеспечивает возможность разработки приложений на языках программирования, соответствующих стандарту IEC 61131-3 для программируемых логических контроллеров (ПЛК). Одним из важных преимуществ данной программы является возможность использования персональных компьютеров для симуляции работы ПЛК. Это позволяет провести тщательную отладку созданного программного кода до его фактического внедрения в реальное устройство.

Основным звеном, связующим программные пакеты Ansys Mechanical APDL и CoDeSyS v.2.3.9, является приложение Simulink ППП MATLAB [101]. Для решения проблемы обмена данными между и обеспечения возможности совместной работы написаны сценарии обмена данными между программой для численного моделирования ANSYS Mechanical APDL и средой CoDeSyS v.2.3.9, которые позволяют реализовать процесс работы с программируемым контроллером. При моделировании программной реализации численная модель процесса индукционного нагрева, разработанная в ANSYS Mechanical APDL, рассматривается в качестве ОПП, а персональный компьютер симулирует работу ПЛК при помощи программы CoDeSys.

Коммуникация программ CoDeSyS и MATLAB Simulink осуществляется по протоколу OPC, представляющих набор программных технологий, которые предоставляют единый интерфейс для управления различными устройствами и обмена данными. OPC состоит из двух частей: OPC клиента и OPC сервера. OPC технология предполагает настройку программ CoDeSyS в качестве OPC-сервера и дальнейшее подключение к нему ПО MATLAB при использовании набора инструментов OPC Toolbox [20].

Для обеспечения взаимодействия между ANSYS Mechanical APDL и MATLAB Simulink применяется клиент-серверная архитектура, в которой ANSYS действует в роли сервера, а MATLAB выполняет функции клиента. Для активации ANSYS-сервера существует два варианта: либо используется стандартный набор команд (раздел 4.2), либо через специализированное приложение ANSYS AAS toolbox. Общий вид Simulink-модели программной реализации алгоритма управления представлен на рисунке 5.24.

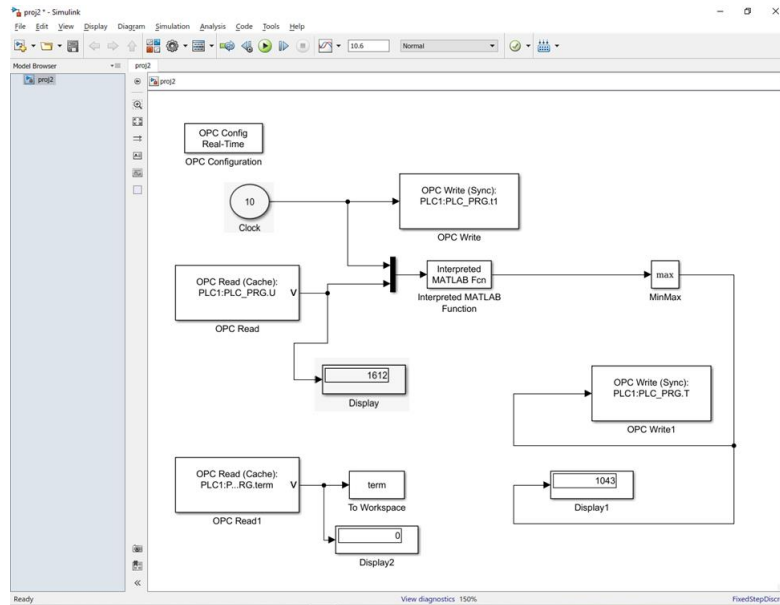


Рисунок 5.24 – Simulink-модель для программной реализации алгоритма управления

Внутри модели Simulink, имеется файл, представленный блоком Interpreted MATLAB Function (рис. 5.25), который позволяет запускать файлы с расширением ".m" прямо в Simulink. Этот механизм обеспечивает передачу управляющего воздействия, формируемого в контроллере, в модель Simulink через технологию OPC. Затем эти данные передаются в ANSYS-модель процесса для расчета одного временного шага.

Таким образом, происходит поочередное взаимодействие между Simulink и ANSYS, где новые значения силы тока индуктора и временного шага передаются для каждого расчетного шага ANSYS-модели. Этот цикл продолжается, обеспечивая непрерывное взаимодействие и обмен данными между системами.

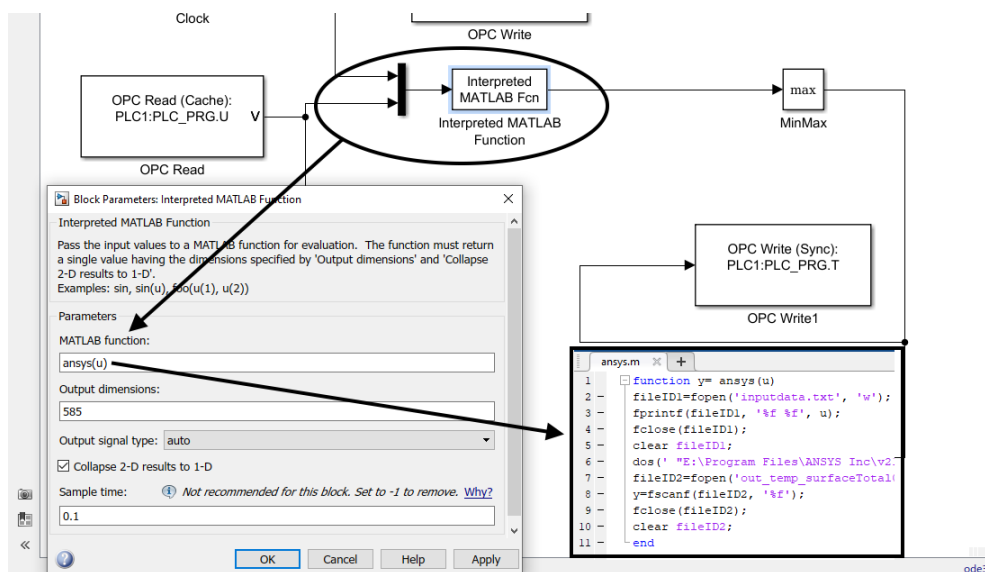


Рисунок 5.25 – Simulink-модель для программной реализации алгоритма управления с интеграцией модели, разработанной в ANSYS Mechanical APDL

В программу Codesys v2.3.9 включен эмулятор «PLCWinNT24», который используется вместо реального программируемого контроллера для симуляция процесса на персональном компьютере, что позволяет виртуально собрать цепь с ПЛК ОВЕН для виртуальной проверки. Окно программы «PLCWinNT24» с загруженным алгоритмом в рабочем процессе симуляции ПЛК на ПК представлено на рисунке 5.26.

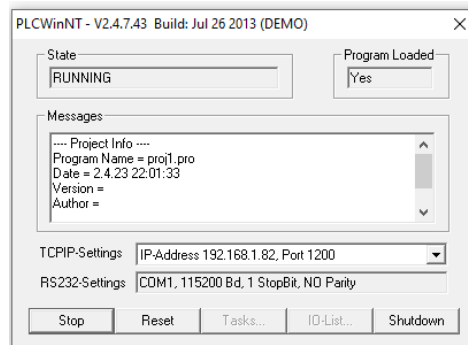


Рисунок 5.26 – Программа «PLCWinNT24» для симуляции ПЛК на ПК

Сначала алгоритм управления программируется в CoDeSyS и далее загружается в виртуальный программируемый логический контроллер. Одним из вариантов программной реализации алгоритма управления может быть загрузка в контроллер алгоритма управления силой тока индуктора, имеющего вид кусочно-постоянной функции, значения которой на каждом временном шаге находятся с помощью численного решения задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям (раздел 5.2). Предусмотрена возможность аппроксимации кусочно-ступенчатой функции времени с помощью непрерывной временной зависимости. Для этого найденный массив значений силы тока индуктора обрабатывается в стандартном приложении Curve Fitting Tool из программного пакета MATLAB [105]. Приложение обладает набором функции обработки массивов данных и позволяет выполнить аппроксимацию данных. Максимальная точность была получена при разбиении интервала движения по ограничению на четыре участка, на одном из которых алгоритм управления током индуктора аппроксимируется с помощью функции Фурье 8 порядка следующего вида:

$$\begin{aligned}
 f(x) = & a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot x \cdot w) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot x \cdot w) + \\
 & a_3 \cdot \cos(3 \cdot x \cdot w) + b_3 \cdot \sin(3 \cdot x \cdot w) + a_4 \cdot \cos(4 \cdot x \cdot w) + b_4 \cdot \sin(4 \cdot x \cdot w) + \\
 & a_5 \cdot \cos(5 \cdot x \cdot w) + b_5 \cdot \sin(5 \cdot x \cdot w) + a_6 \cdot \cos(6 \cdot x \cdot w) + b_6 \cdot \sin(6 \cdot x \cdot w) + \\
 & a_7 \cdot \cos(7 \cdot x \cdot w) + b_7 \cdot \sin(7 \cdot x \cdot w) + a_8 \cdot \cos(8 \cdot x \cdot w) + b_8 \cdot \sin(8 \cdot x \cdot w)
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Коэффициенты в выражении (5.9) определены при помощи стандартного приложения MATLAB – Curve Fitting Tool в автоматическом режиме (рис.5.27).

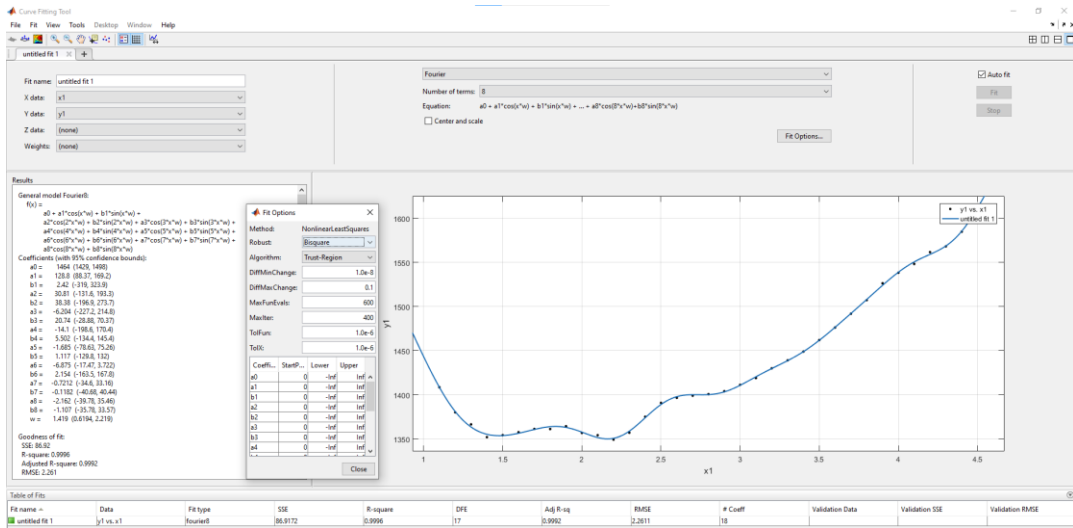


Рисунок 5.27 – Аппроксимация полученного кусочно-постоянного управления функцией Фурье в приложении Curve Fitting Tool

Таким образом, искомый алгоритм управления для задачи с ограничением на максимально допустимую температуру заготовки имеет вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1584,9 A, t \in [0,1); \\ 1561,6 A, t \in [1,1.1); \\ f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \sin(x * w) + a_2 * \cos(2 * x * w) + b_2 * \sin(2 * x * w) + \\ a_3 * \cos(3 * x * w) + b_3 * \sin(3 * x * w) + a_4 * \cos(4 * x * w) + b_4 * \sin(4 * x * w) + \\ a_5 * \cos(5 * x * w) + b_5 * \sin(5 * x * w) + a_6 * \cos(6 * x * w) + b_6 * \sin(6 * x * w) + \\ a_7 * \cos(7 * x * w) + b_7 * \sin(7 * x * w) + a_8 * \cos(8 * x * w) + b_8 * \sin(8 * x * w), t \in [1.1, 4.5) \\ 1612,1 A, t \in [4.5, 10]. \end{cases} \quad (5.10)$$

Отображение изменений параметров можно наблюдать в режиме реального времени на предварительно настроенной вкладке визуализация через графический интерфейс программы рис.5.28.

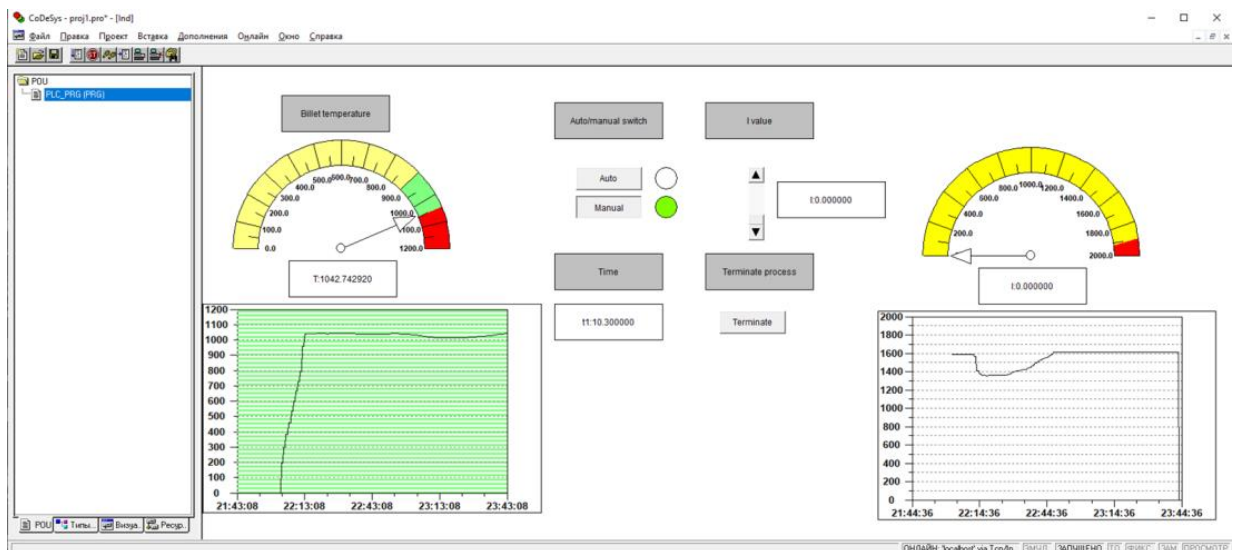
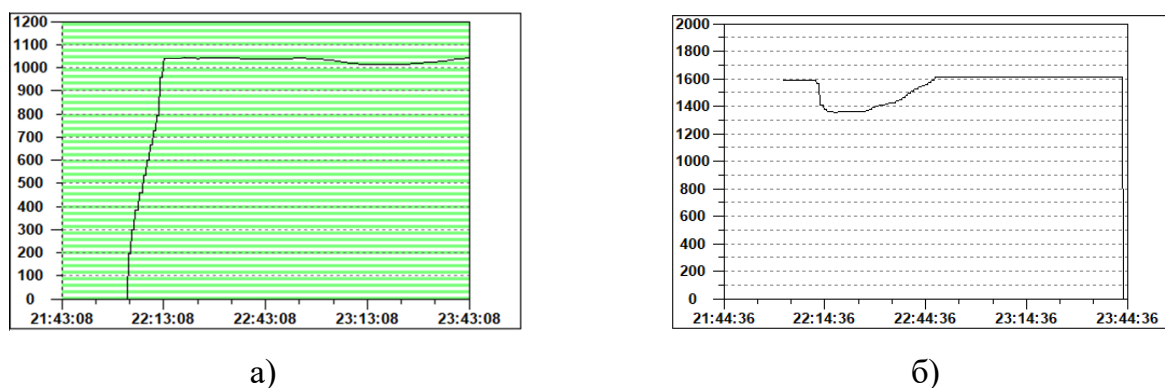


Рисунок 5.28 – Окно визуализации в интерфейсе программы CoDeSys v2.3.9

На рисунке 5.29 укрупненно представлены графики изменения максимальной температуры заготовки и силы тока индуктора на всем протяжении процесса индукционного нагрева.



а – максимальная температура заготовки; б – алгоритм управления током индуктора

Рисунок 5.29 – Графическое отображение параметров процесса на стадии нагрева в Codesys v2.3.9

Техническая реализация автоматизированной системы управления и контроля температуры для ряда задач предполагает использование приборов для измерения температуры поверхности заготовки. Например, для сопоставления результатов моделируемых значений температур на поверхности заготовки в конкретный момент времени с реальными данными, применяют бесконтактные пирометры, которые передают информацию через протокол, совместимый с выбранным контроллером. В качестве измерительного прибора для этой цели рекомендуется использовать стационарный инфракрасный пирометр Термоскоп-800-1С отечественного производителя (рис. 5.30) [134]. Пирометры этой серии предназначены для измерения температуры тел с высокой точностью в диапазоне от 300 до 2000°С в технологических процессах, характеризующихся сложными производственными условиями (высокая температура, влажность окружающей среды и т.д.). Предложенный пирометр позволяет изменить фокусное расстояние, что обеспечивает высокую точность измерения на любом расстоянии от измеряемого объекта.



Рисунок 5.30 – Стационарный инфракрасный пирометр Термоскоп-800-1С

Основные характеристики пирометра:

- Точность измерения: не более 0,5%;
- Воспроизводимость результатов измерения: 0,25%;
- Разрешение измеряемой температуры: 1°C;
- Быстродействие пирометра: не более 50 мс (0,05 с);
- Настройка излучательной способности: изменяется с шагом 0,01 и принимает значения от 0,1 до 1;
- ПО пирометра позволяет использовать следующие алгоритмы: измерения текущей температуры; выборка максимального или минимального значения, среднего значения по выборке; определение разницы между максимальным и минимальным измеренными значениями температуры.

Прибор поддерживает выходной сигнал аналогового типа: токовый линейный выход 4...20 мА с максимальным сопротивлением в сигнальной цепи не более 750 Ом; цифрового типа: с поддержкой интерфейса RS-485 и протокола типа MODBUS, для подключения в цепь пирометров типа Термоскоп-800-1С.

Технические средства автоматизации, подходящие для рассматриваемого процесса, можно собрать из устройств, предлагаемых компанией ОВЕН. Для взаимодействия устройств автоматизации ПЛК должен обладать следующими характеристиками: наличием аналоговых входов и выходов, быстрым откликом аналогового входа, а также наличием интерфейса RS-485 для подсоединения выбранного пирометра. ПЛК-160 от компании ОВЕН (рис. 5.31а) соответствует всем вышеуказанным критериям [118]. Для создания системы визуализации на базе Codesys рекомендуется использовать операторскую панель ОВЕН СП307-Б (стандартную или улучшенную версию) (рис. 5.31б) [119].



а – ПЛК 160; б – мониторы оператора семейства ОВЕН СП3xx

Рисунок 5.31 – Устройства для технической реализации автоматизации от компании ОВЕН

Преимуществами данного ПЛК являются: наличие встроенных дискретных и аналоговых входов/выходов; скоростные входы для обработки энкодеров; простое и удобное программирование в системе CODESYS V.2.3 через порты USB Device, Ethernet, RS-232 Debug; передача данных на верхний уровень через Ethernet или GSM-сети (GPRS); наличие последовательных портов (RS-232, RS-485); управление частотными преобразователями; подключение панелей операторов, GSM-модемов и др. Время, необходимое для проведения опроса одного из выходов в данном контроллере составляет 0.01 с, что соответствует требованию к быстродействию, установленному для контроллера в контексте рассматриваемых процессов. На рисунке 5.32 представлена функциональная схема ПЛК 160 с обозначением всех имеющихся входов и выходов.

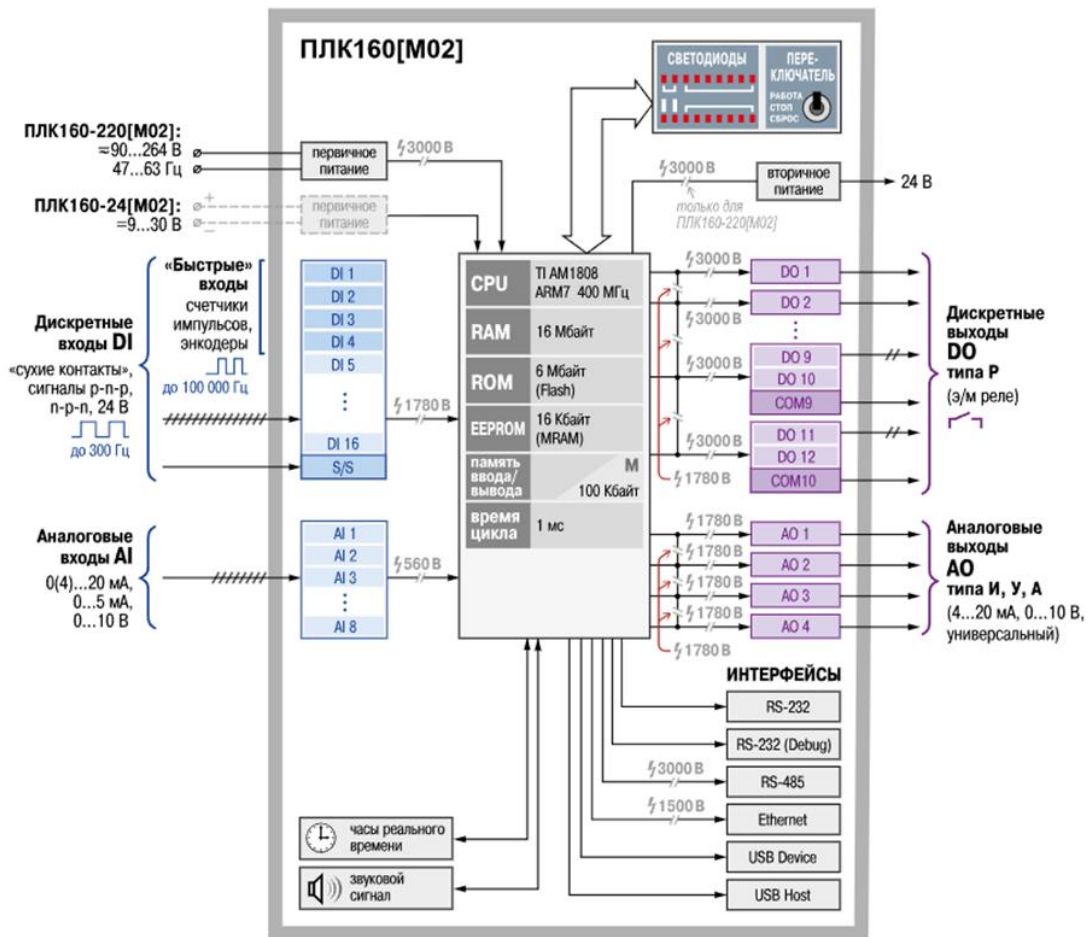


Рисунок 5.32 – Функциональная схема ПЛК 160 [126]

Предложенный вариант программно-технической реализации алгоритма управления процессом поверхностного индукционного нагрева под закалку на участке движения по ограничению на максимально допустимую температуру может быть также использован при необходимости для реализации алгоритма управления на участке движения по ограничению на максимальное допустимое термонапряжение.

5.5 Выводы по пятой главе

1. Разработанные в диссертации 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 ступенчатой втулки по окончании стадии индукционного нагрева под закалку с учетом технологических ограничений на максимальную допустимую температуру и термические напряжения.

2. Представлены результаты решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора на основе альтернансного метода параметрической оптимизации СРП без учета фазовых ограничений на максимально допустимые температуры и термонапряжения для заготовки сложной геометрической формы, детальный анализ которых позволил выявить значения температур в процессе нагрева, превышающие допустимые по технологии ограничения. Для устранения перегрева решена задача поиска алгоритма управления током индуктора на особом участке, результаты которой показали снижение равномерности температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя, что вызвало необходимость поиска повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения на максимально допустимые температуры при помощи альтернансного метода.

3. Повторное решение задачи совместной оптимизации с учетом ограничений позволило повысить равномерность температурного распределение и в совокупности обеспечить значительное снижение максимального температурного отклонения от заданного значения вдоль границы закаливаемого слоя от $\pm 200^{\circ}\text{C}$ до $\pm 40,6^{\circ}\text{C}$ без перегревов поверхностных слоев. Согласно диаграмме аустенитного превращения анализируемое конечное отклонение температуры $\pm 40,6^{\circ}\text{C}$ находится в интервале температур выше линии АС3, при которых формируется аустенитная микроструктура. Термические напряжения после повторного решения задачи совместной оптимизации с учетом фазового ограничения на максимальную допустимую температуру не превышают предел упругости в 335 МПа. Таким образом можно считать, что полученный результат отвечает технологическим требованиям.

4. Результаты моделирования температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя, полученные в индукторе с оптимальными параметрами в конце стадии нагрева для номенклатуры деталей с длиной выступа 7, 7.5, 8 мм показали, что при изменении длины выступа в указанных пределах значения температуры в конце стадии нагрева вдоль границы закаливаемого слоя не опускаются ниже предельного значения, при котором происходит начало формирования аустенитной микроструктуры, а температурное отклонение выросло до $\pm 72^{\circ}\text{C}$ при нагреве детали с выступом 7 мм. Таким образом, даже при существенных изменениях радиуса выступа в указанных диапазонах, найденные конструктивные и режимные параметры можно считать оптимальными.

5. Анализ результатов моделирования тепловых полей и полей термических напряжений на стадии охлаждения при указанных исходных данных показал отсутствие нарушения ограничений.

6. Рассмотрен вариант возможной программной и технической реализации алгоритма управления в задаче с технологическим ограничением на максимальную температуру заготовки, для которой используется связка программ CoDeSys, ANSYS и MATLAB. Важной особенностью программного пакета CoDeSys является возможность его использования в режиме симуляции работы ПЛК. При этом численная ANSYS модель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки выступает в качестве объекта управления. Техническая реализация может быть выполнена на базе современных средств автоматизации компании ОВЕН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В программном пакете ANSYS Mechanical APDL разработана нелинейная двумерная осесимметричная модель стадии индукционного нагрева и охлаждения процесса поверхностной закалки стальных заготовок с угловой зоной для анализа и оптимизации взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, полей термических напряжений и упругопластических деформаций. Проведена верификация разработанной нелинейной численной модели.

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

3. Сформулирована задача поиска вектора параметров повышенной размерности, представляющего совокупность векторов конструктивных и режимных параметров. 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 особых временных интервалах движения по фазовым ограничениям на максимально допустимые температуры и термонапряжения, которая, в отличие от известных, позволяет контролировать отсутствие локальных перегревов и превышение пределов термонапряжений по всему объему закаливаемого слоя заготовки сложной геометрической 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 L-образной формы 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 интеграции двумерной нелинейной осесимметричной модели процесса закалки стальных заготовок с угловыми зонами, разработанной в ANSYS Mechanical APDL, и системы компьютерной математики MATLAB.

7. Результаты решения задачи совместной оптимизации с учетом технологического ограничения позволили выявить область, в которой наблюдались значения температур, превышающие предельно допустимые технологические требования в процессе нагрева. Последовательное решение задачи поиска алгоритма управления на особом участке, а также совместной оптимизации с учетом технологического ограничения на максимально допустимые температуры при помощи альтернативного метода позволило определить значения конструктивных и режимных параметров индуктора, при которых обеспечивается достаточная равномерность температурного поля вдоль границы закаливаемого слоя заготовки сложной геометрической формы в конце стадии нагрева при отсутствии недопустимых перегревов на всем протяжении процесса.

8. Предложен вариант технической реализации алгоритма управления, найденного в результате решения задачи с ограничением на максимально допустимую температуру нагреваемой детали.

9. Решение поставленных в диссертационном исследовании задач на основе разработанных методик позволило повысить равномерность температурного распределение и обеспечить значительное снижение максимального температурного отклонения от заданного значения вдоль границы закаливаемого слоя от $\pm 200^{\circ}\text{C}$ 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 упругости 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутковский А.Г. Структурная теория распределённых систем. М.: Наука, 1977. – 320 с.
2. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отделение 1981. – 328 с.
4. Егоров Ю. В. Необходимые условия оптимальности в банаховом пространстве // Математический сборник (новая серия), 1964. Т. 64 (106). № 1. с. 79-101.
5. Егоров Ю.В. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами // В кн.: Математика на службе инженера. М.: Знание, 1973. С. 187-199.
6. Лившиц М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: Автореф. дис... докт. техн. наук. – Самара, 2001. – 46 с.
7. A. Aliferov, and S. Lups, Induction and Conduction Heating, Novosibirsk State Technical University, ISBN 978-3-7782 1622-8, 2011, p 410.
8. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. – 309 с.
9. NACKE В. et al. Power supplies. Mathematical simulation and optimization, Intensive Course Basic II, St. Petersburg 2013.
10. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Методы полубесконечной оптимизации в прикладных задачах управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 2021. – 286 с.
11. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
12. Яицков С.А. Ускоренный изотермический индукционный нагрев кузнечных заготовок. - М.: Машгиз, 1962. – 96 с.
13. Демидович В.Б. Программное обеспечение для моделирования и расчета индукционных нагревателей / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко// Индукционный нагрев. – 2009. - №9. – С. 10-15.

14. Демидович В.Б. Оптимальное проектирование индукционных нагревателей с использованием численных моделей / В.Б. Демидович, Ф. В. Чмиленко, И.И. Растворова // Индукционный нагрев. – 2011. - №15. – С. 6-10.
15. Кувалдин А. Б., Лепешкин А. Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. – Москва : ИНФРА-М, 2020. –273 с.
16. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: Монография. – Новосибирск: Изд.-во НГТУ, 2006. – 286 с.
17. Кувалдин А.Б. Скоростной индукционный нагрев металлических цилиндрических заготовок с учетом термонапряжений и упругопластических свойств / А. Б. Кувалдин, А. Р. Лепешкин // Электричество: Теорет. и науч.-практ. журн. - 2002. - №6. - С. 30-36.
18. Кувалдин А.Б. Расчет распределений температур, термических и остаточных напряжений при скоростной индукционной закалке / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы энергосбережения. Теплообмен в электротермических и факельных печах и топках». Тверь, ТГТУ 2004 – с. 64-68.
19. Коршиков С.Е. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева цилиндрических слитков с учетом технологических ограничений: Автореф. дис... канд. техн. наук – Самара, 2015 – 24 с.
20. Попов А.В. Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки: Автореф. дис... канд. техн. наук – Самара, 2020 – 24 с.
21. 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.
22. 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.
23. Pleshivtseva Y., Popov A., Pavlushin A. Software Solution for Optimal Design of Inductor for Surface Hardening //2021 3rd International Conference on Control Systems,

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

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

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

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. Справочник ПОЛИТЕГ-МЕТ [Электронный ресурс]. URL: <http://spravka.pmet.biz/fe-fe3c/> (дата обращения 02.02.2023).

35. Rudnev V., Loveless D., Cook R. L. Handbook of induction heating. – CRC press, 2017.

36. V. Rudnev, Induction hardening of steels and cast irons, in Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys, R. Colas and G. Totten (editors), Taylor & Francis, New York, 2016.

37. V. Rudnev, G. Fett, A. Griebel, J. Tartaglia, Principles of induction hardening and inspection, in ASM Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treating, V. Rudnev and G. Totten (editors), ASM International, Materials Park, OH, 2014, pp, 58-86.

38. G. Doyon, V. Rudnev, J. Maher, Induction hardening of crankshafts and camshaft, in ASM Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treating, V. Rudnev and G. Totten (editors), ASM International, Materials Park, OH, 2014, pp, 173-186.

39. G. Doyon, V. Rudnev, J. Maher, F. Andrea, Induction heat treatment of automotive components, Proceedings of Int'l Conference Heating by Electromagnetic Sources, Padua, Italy, May 21-24, 2013.

40. G. Doyon V. Rudnev, J. Maher, R. Minnick. G Desmier, New technology straightens out cam shaft distortion, industriel Heating, December 46-52, 2014.

41. Теоретические основы и аспекты электротехнологий. Физические принципы и реализация. Интенсивный курс Основы I. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 359 с.

42. S. Lupi, Electroheat Teaching notes, Libreria Progetto, Padova, Italy, 2005.

43. Rudnev V. et al. Handbook of Induction Heating. Marcel Dekker Inc //New York. – 2003.

44. Рей У. Методы управления технологическими процессами: пер. с англ. М.: Мир, 1983. – 368 с.

45. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983. – 393 с.
46. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – 2-е изд. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
47. Панасюк В.И., Ковалевский В. Б., Полимько Э.Д. Оптимальное управление в технических системах. Минск: Наука и техника, 1990. – 272 с.
48. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
49. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределёнными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
50. Егоров Ю. В. Некоторые задачи теории оптимального управления //Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1963. – Т. 3. – №. 5. – С. 887-904.
51. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.
52. Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes, L., N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2007. 348 p.
53. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1977. – 480 с.
54. Егоров А. И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978. – 464 с.
55. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М.: Мир, 1972. – 414 с.
56. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами/ А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1979. – 605 с.
57. Бутковский А.Г. Оптимальное управление нагревом металла / А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: Металлургия, 1972. – 439 с.
58. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.
59. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. – 384 с.
60. Peypouquet J. Convex optimization in normed spaces: theory, methods and examples. – Springer, 2015.

61. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. Т. 2. М.: МЦНМО, 2011. – 434 с.
62. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М.: Наука, 1982. – 432 с.
63. Евтушенко Ю. Г. Оптимизация и быстрое автоматическое дифференцирование. М.: ВЦ РАН, 2013. – 144 с.
64. Поляк Б. Т. Градиентные методы минимизации функционалов, решения уравнений и неравенств: дис. канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1963.
65. Плешивцева Ю.Э. Последовательная параметризация управляющих воздействий и полубесконечная оптимизация алгоритмов управления технологическими объектами с распределенными параметрами: дис. д-ра техн. наук / Ю. Э. Плешивцева. – Самара, 2009. – 416 с.
66. Gasnikov A. et al. Convex optimization in hilbert space with applications to inverse problems //arXiv preprint arXiv:1703.00267. – 2017.
67. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: МЦНМО, 2021. — 272 с.
68. Рапопорт Э. Я. Программная реализация обратных связей в задачах параметрической оптимизации не полностью определенных систем с распределенными параметрами // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2016. № 3. С. 36-50.
69. M. Schulze, A. Nikanorov, B. Nacke Hierarchical shape optimization of one-sided transverse flux heating induction coil // COMPEL-THE INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATION AND MATHEMATICS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. – W. Yorkshire: Emerald group, 2020, Vol. 39 No. 1. - Pp. 73-80.
70. Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Б., Никаноров А.Н., Попов А.В. Проектирование индукционных установок на основе решения задач многокритериальной оптимизации // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки: Научный журнал. – Самара: СамГТУ, 2016, №2(50). – С 47-57.
71. Yu. Pleshivtseva, M. Forzan, E. Sieni, A. Popov Multi-Objective Optimization of Induction Surface Hardening Process // Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'18). 2018, pp. 3515-3520.
72. Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Б., Никаноров А.Н., Попов А.В. Designing of induction heating systems based on three-criteria numerical optimization //

Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIX Международной конференции (12-15 сентября 2017 г. Самара, Россия) / Под ред.: акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. – Самара: ООО «Офорт», 2017. – 616 с. – С. 37-44.

73. M. Baldan, T. Steinberg, E. Baake Self-adaptive multimethod optimization applied to a tailored heating forging process. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 355 (2018) 012016.

74. Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М.:Наука, 1978. – 476 с.

75. Рапопорт Э.Я. Робастная параметрическая оптимизация динамических систем в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика, 1995. № 3. С. 86-96.

76. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977. 392 с.

77. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Технология оптимального проектирования сложно структурированных систем с распределенными параметрами: программные стратегии принятия решения // Онтология проектирования, 2017. Т. 7. № 2 (24). С. 172-190.

78. Кубышкин В.А., Финягина В. И. Подвижное управление в системах с распределенными параметрами. М.: СИНТЕГ, 2005. 232 с.

79. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.

80. Малый С.А. Экономичный нагрев металла. – М., Металлургия, 1967. – 191 с.

81. Андреев Ю. Н., Федоренко Р. П., Черняховский Е. З. Опыт применения приближенных решений задач оптимального управления в инженерно-конструкторских разработках. I //Автоматика и телемеханика. – 1980. – №. 8. – С. 16-26.

82. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. – М.: Наука, 1970. – 280 с.

83. Головин Г. Ф., Замятнин М. М. Высокочастотная термическая обработка. Изд. 3. – 1990.

84. Перевалов Ю. Ю. Моделирование и разработка автоматизированной индукционной закалочной установки крупногабаритных валков прокатных станов: дис. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017.
85. Liu L. et al. Stress field simulation of carburized specimens with different carbon content during quenching process //Materials Letters. – 2007. – Т. 61. – №. 4-5. – С. 1251-1255.
86. Yang J. et al. Numerical Simulation of the Quenching Process of U71Mn Rail-Head: Based on ANSYS Software //2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – IEEE, 2010. – Т. 2. – С. 811-816.
87. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение. 1991. – 207 с.
88. Barka N., Chebak A., Brousseau J. Optimization of hardness profile of bearing seating heated by induction process using axisymmetric simulation //Piers Online. – 2011. – Т. 7. – №. 4. – С. 316-320.
89. L. Jakubovicova, A. Gasparec, P. Kopas, et al. Optimization of the induction heating process in order to achieve uniform surface temperature // PROCEEDIA ENGINEERING. – Elsevier, 2016, Vol. 136. – Pp. 125-131.
90. T. Leuca, S. Nagy, N. Trip et al. Optimal design for induction heating using genetic algorithms. REVUE ROUMAINE DES SCIENCES TECHNIQUES-SERIE ELECTROTECHNIQUE ET ENERGETIQUE, 60 (2015), pp. 133-142.
91. A. Aliferov, P. Di Barba, F. Dughiero et al. Optimal design methods for the uniform heating of tube ends for stress relieving. // COMPEL-THE INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATION AND MATHEMATICS IN ELECTRICAL ANDELECTRONIC ENGINEERING. – W. Yorkshire: Emerald group, 2020, Vol. 39 No. 1. - Pp. 12-20.
92. Обухова А.В., Клочкова Н.Н., Клочков А.А. Подход к оптимальному проектированию индукционной системы «индуктор-деталь» // Научный альманах. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания «Юком», 2019, №10-2(60). – с. 96-100.
93. Клочкова Н.Н., Обухова А.В., Обухова Ю.В. Проектирование индукционного нагревателя для нагрева осесимметричной заготовки // Труды конференции «Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции,

инновации» 28-29 апреля 2015 г. – М.: Научно-издательский центр «Открытие», 2015. – С.68-71.

94. S. Galunin, M. Kudryash, K. Blinov et al. Numerical simulation and optimization of heater for induction hardening of leading wheel gear // 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW). – St. Petersburg, 2015. – pp. 192-195.

95. T. Kozulina, S. Galunin, K. Blinov et al. Numerical optimization of induction heating systems // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW). – St. Petersburg, 2016. – pp. 621-624.

96. M. Belyaev, S. Galunin, V. Ishin, T. Kozulina Numerical simulation and optimization of heater for scanning induction hardening of shaft // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW). – St. Petersburg, 2016. – pp. 499-501.

97. Rodman D. et al. Induction hardening of spur gearwheels made from 42CrMo4 hardening and tempering steel by employing spray cooling //steel research international. – 2011. – Т. 82. – №. 4. – С. 329-336.

98. Rodman D. et al. Modeling of Spray Cooling during Induction Hardening of Spur Gearwheels Made from 42 C r M o4 Hardening and Tempering Steel //steel research international. – 2014. – Т. 85. – №. 5. – С. 741-755.

99. Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. Под ред. А. Н. Шамова. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 87с.: (Б-чка высокочастотника-термиста; Вып.3). ISBN: 5-217-00926-8;

100. ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 06.05.2023).

101. MATLAB Documentation [electronic source]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения 20.06.2023).

102. Codesys [Электронный ресурс]. URL: <https://www.codesys.com/> (дата обращения 20.05.2023).

103. Altair FLUX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.altair.com/flux/> (дата обращения 25.04.2023).

104. COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения 01.02.2023).
105. SOLIDWORKS | 3D CAD Design Software & PDM Systems [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения 01.02.2023).
106. Abaqus | Инженерные программы | ТЕСИС [Электронный ресурс]. URL: https://tesis.com.ru/cae_brands/abaqus/ (дата обращения 01.02.2023).
107. ELCUT [Электронный ресурс]. URL: <https://elcut.ru/index.htm> (дата обращения 01.02.2023).
108. Agros2D [Электронный ресурс]. URL: <http://www.agros2d.org/> (дата обращения 01.02.2023).
109. Elmer [Электронный ресурс]. URL: <https://www.csc.fi/web/elmer> (дата обращения 01.02.2023).
110. FREEFEM++ [Электронный ресурс]. URL: <http://www3.freefem.org/> (дата обращения 01.02.2023).
111. ONELAB [Электронный ресурс]. URL: <http://onelab.info/> (дата обращения 01.02.2023).
112. OPENFOAM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openfoam.com/> (дата обращения 01.02.2023).
113. Шарапова О.Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2011. – 22 с.
114. Башнин Ю.А. Технология термической обработки стали/Башнин Ю //А., Ушаков БК, Секей АГ-Москва. – 1986.
115. Ильюшин А.А. Пластичность. Часть 1. Уругопластические деформации. М. -Л.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.
116. Одинг И.А. Структурные признаки усталости металлов как средство установления причин аварий машин. – М., Издательство Академии Наук СССР, 1949. – 77 с.
117. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости 2-е изд. - М.: Наука, 1979. - 560 с. - Пер. с англ. - Под ред. Г.С. Шапиро.
118. Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали: справочник //М.: Машиностроение. – 1992. – 480 с.

119. Справочник металлопроката [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lsst.ru/spravochnik-metalloprokata/konstruktsionnaya-stal/ctal-40/> (дата обращения 04.05.2020).
120. Orlich J., Rose A., Wiest P. Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle: Band 3: Zeit, Temperatur, Austenitierung, Schaubilder. – Matplus GmbH, 1973.
121. Интернет и право [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58245/> (дата обращения 01.05.2023).
122. Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Совместная оптимизации по системным критериям качества взаимосвязанных процессов технологической теплофизики в производственных комплексах обработки давлением // Автометрия, 2013. Т. 49. № 6. С. 3-13.
123. Рапопорт Э. Я. Минимаксная оптимизация стационарных состояний в системах с распределенными параметрами // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2013. № 2. С. 3-18.
124. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Технология оптимального проектирования сложноструктурированных систем с распределенными параметрами: программные стратегии принятия решения // Онтология проектирования, 2017. Т. 7. № 2 (24). С. 172-190.
125. ООО «Инфратест» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infratest.ru/product/fixed/13.html> (дата обращения 01.06.2023).
126. ОВЕН панели оператора [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/catalog/programmiruemie_logicheskie_kontrolleri (дата обращения 25.07.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка об использовании результатов кандидатской диссертации



Акционерное общество
«Самарский металлургический завод»
(АО «СМЗ», ОГРН 1026300763389)

443051, Россия, г. Самара
ул. Алма-Атинская, 29, корп. 33/34

Info.smz@samara-metallurg.ru
Тел.: 8 846 278 34 12
Факс: 8 846 278 34 14
www.samara-metallurg.ru

№ 800/312

«26» июля 2023 г.

По месту требования

СПРАВКА

об использовании результатов

кандидатской диссертации А.В. Павлушина

«Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под индукционную закалку изделий сложной геометрической формы»

Основные выводы и рекомендации, полученные в диссертации А.В. Павлушина «Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под индукционную закалку изделий сложной геометрической формы», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы при разработке технологии поверхностной индукционной закалики соответствующих изделий.

По нашей оценке внедрение результатов этой работы позволяет повысить качество микроструктуры производимых деталей, повысить твердость поверхностного слоя. В качестве дополнительного положительного эффекта мы видим предотвращение образования микротрещин в металле и, соответственно, снижение количества отбракованных изделий.

Директор по качеству и технологии



Павленко А.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка об использовании результатов кандидатской диссертации

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Группа Компаний ИНФОПРО»



ЮРИДИЧЕСКИЙ АДРЕС

115446, г. Москва
проезд Коломенский
дом 14, помещение 41

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС

443063, г. Самара
Ново-Вокзальный тупик
дом 21/36, приемная

КОНТАКТЫ

Тел.: 8-800-600-24-01
8 (495) 105-92-32
post@info-pro.ru
www.info-pro.ru

РЕКВИЗИТЫ

ОГРН 1106315000813
ИНН 6315630208
КПП 772401001
ОКПО 64945206

Исх.№ 23 от 22.06.2023

Для предоставления по месту требования

СПРАВКА

об использовании результатов
кандидатской диссертации А.В. Павлушина
«Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под
индукционную закалку изделий сложной геометрической формы»

Основные подходы к построению численных нелинейных электротепловых моделей и вычислительные технологии интеграции численных моделей в оптимизационные процедуры, полученные в диссертации А.В. Павлушина «Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под индукционную закалку изделий сложной геометрической формы», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использовались при разработке программных комплексов для оптимизации, моделирования энергоэффективных режимов работы электротехнологических объектов и расчета их технико-экономических характеристик.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР
Сергиенко Павел Владимирович



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ



Утверждаю:
 Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО «СамГТУ»
 профессор
 Юсупова О.В.
 « 4 » июля 2023 г.

АКТ

научно-технической комиссии о внедрении результатов диссертационной работы
 на соискание ученой степени кандидата технических наук
 Павлушина Алексея Владимировича

«Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под
 индукционную закалку изделий сложной геометрической формы».

Комиссия в составе д.т.н., профессора, зав. кафедрой УСАТСК Лившица М.Ю., к.т.н., доцента, зам. зав. кафедрой УСАТСК Деревянова М.Ю. и к.т.н., доцента кафедры УСАТСК Гавриловой А.А. составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в рамках диссертационной работы Павлушина А.В., внедрены в учебный процесс на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Результаты диссертационной работы Павлушина А.В. использованы при изучении дисциплины «Методы и средства численного моделирования энерготехнологических процессов» образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике и теплотехнике»;

- при изучении дисциплины «Вычислительные методы и компьютерные технологии в управлении теплоэнергетическими системами» образовательной программы магистратуры по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Оптимизация и интеллектуализация автоматизированных процессов управления в теплоэнергетике и энерготехнологиях».

Заведующий кафедрой «УСАТСК»,
 д.т.н., профессор



 подпись

М. Ю. Лившиц

Зам. зав. кафедрой «УСАТСК»,
 к.т.н., доцент



 подпись

М. Ю. Деревянов

К.т.н., доцент кафедры «УСАТСК»



 подпись

А. А. Гаврилова