

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по научной работе
К.Т.Н.


А.И. Отто


2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) на диссертационную работу Павлушина Алексея Владимировича «Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под индукционную закалку изделий сложной геометрической формы», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности **2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами**

Актуальность темы диссертационной работы

Непрерывное внедрение инновационных технологий и совершенствование традиционных технологических процессов неразрывно связано с разработкой конструктивных методов решения задач оптимального управления и проектирования. Указанные задачи существенно усложняются применительно к объектам с распределенными параметрами, особенно в условиях, когда максимальный эффект по выбранному критерию эффективности может быть достигнут только при более общей постановке задачи выбора оптимальных проектных решений одновременно с определением оптимальных режимов последующего функционирования объекта. Разработка методик и вычислительных технологий решения подобных задач совместной оптимизации, безусловно, относится к актуальному направлению развития современной теории управления и ее приложений к практическим задачам оптимизации технологических процессов и производств в различных отраслях промышленности.

Учет ужесточающихся требований к производству деталей высокой прочности и надежности, особенно при их специфической форме, приводит к актуальной проблеме разработки новых методов совместной оптимизации конструктивных параметров установок для индукционной закалки и режимов их работы, с целью обеспечения равномерности микроструктуры и улучшения качества деталей. Поскольку процесс индукционной закалки представляет собой объект, поведение которого во времени характеризуется пространственно-временным изменением взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, а также полей термонапряжений, заявленная в диссертации мультифизическая задача относится к актуальным задачам современной теории управления системами с распределенными параметрами.

Структура и содержание диссертационной работы

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

Во введении обосновывается актуальность работы, определяется цель исследования и основные задачи для её достижения, перечисляются методы исследования, описывается научная новизна и практическая значимость полученных в диссертационном исследовании результатов, формулируются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации основных выводов, результатов и положений диссертации.

В *первой* главе выполнен обзор современного состояния исследования, связанного с индукционным нагревом деталей сложной формы для поверхностной закалки. Описаны физические основы процесса закалки, рассмотрены геометрические особенности изделий, при закалке которых возникают нетривиальные проблемы обеспечения требуемой равномерности температурного распределения в процессе индукционного нагрева. На основе анализа степени разработанности темы определена содержательная постановка задачи совместной оптимизации проектных решений и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева заготовок сложной формы под поверхностную закалку, которая формулируется в диссертации в терминах теории управления СРП.

Во *второй* главе проведен анализ программных пакетов для численного моделирования и обоснован выбор ППП ANSYS Mechanical APDL в качестве инструмента конечно-элементного анализа мультифизических процессов. Разработан алгоритм для построения модели исследуемого процесса закалки на

стадиях нагрева и охлаждения с учетом нелинейных теплофизических свойств материала. Проанализировано влияние конструкции индуктора и режимов работы нагревателя на распределение температуры в угловой зоне ступенчатой втулки из углеродистой стали. На основе результатов моделирования выявлена принципиальная проблема существующей недопустимой неравномерности распределения температуры вдоль границы закаливаемого слоя заготовок сложной формы, особенно в их угловой области. Для подтверждения соответствия результатов моделирования известным физическим закономерностям и обоснования возможности их использования в оптимизационной процедуре проведена верификация модели.

В *третьей* главе формулируется задача совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева под поверхностную закалку стальных ответственных деталей сложной геометрической формы. Для решения задачи совместной оптимизации с учетом технологических ограничений на максимально допустимую температуру и максимально допустимые термонапряжения автором разработана универсальная общая методика, включающая последовательное итерационное 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. Представлены системы уравнений для поиска решения задачи совместной оптимизации относительно вектора оптимизируемых параметров повышенной размерности, включающего конструктивные и режимные параметры. Описаны правила построения систем уравнений на основе альтернансного метода параметрической оптимизации. Представлена методика численного решения нелинейных задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям.

В *четвертой* главе диссертации предложены оптимизационные процедуры в программном комплексе в ППП MATLAB с интегрированными в них численными моделями, разработанными в пакете ANSYS Mechanical APDL. Описывается построение общей схемы численной реализации оптимизационных процедур, которая позволяет выполнить итерационный поиск решения системы трансцендентных уравнений, составленной на основе альтернансного метода, и определение управления на каждом временном шаге интервала движения по ограничению.

В *пятой* главе приведены и проанализированы результаты численного решения сформулированных задач, полученные с помощью предло-

женных и в 4 главе численных процедур. Рассмотрен вариант возможной программной и технической реализации алгоритма управления в задаче с технологическим ограничением на максимальную температуру заготовки, для которой используется совместная работа программ CoDeSys, ANSYS и MATLAB.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Каждый раздел диссертационной работы является достаточно полным и содержательным изложением соответствующей части исследования. Последовательность и содержание разделов имеют логически завершенный характер. Диссертация написана грамотным и понятным языком.

Научная новизна полученных результатов

К числу основных научных результатов, полученных в диссертационной работе Павлушина А.В., можно отнести следующие.

1. Разработана универсальная методика решения задачи совместной оптимизации проектных решений и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки, которая:

- предоставляет возможность совокупной оптимизации конструктивных и режимных параметров индуктора с целью достижения наиболее равномерного температурного распределения в упрочняемом слое деталей сложной формы;

- обеспечивает выполнение технологических требований, предписанных для исключения локальных перегревов и недопустимых термонапряжений в процессе нагрева.

2. Для решения задачи совместной параметрической оптимизации, на основе альтернансного метода разработаны методика и вычислительная технология, позволяющие определять значения параметров конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой для поверхностной закалки. К принципиальной особенности применения в диссертационной работе альтернансного метода следует отнести введение в рассмотрение суммарного вектора оптимизируемых параметров повышенной размерности, представляющего совокупность векторов конструктивных и режимных параметров.

3. Создана 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 программном комплексе MATLAB разработаны итерационные оптимизационные процедуры, которые позволяют решать задачи оптимального проектирования и управления индуктором, и предусматривают интеграцию численной модели электромагнитных и температурных полей, а также поля термических напряжений, разработанной в ANSYS Mechanical APDL.

Достоверность результатов работы

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.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, использовались при выполнении: проекта РФФИ №19-08-00232, (2019-2021 гг.); проекта РНФ № 22–29–00180, (2022–2023 гг.); НИР в рамках проектной части государственного задания №0778-2020-0005 «Программа фундаментальных исследований СамГТУ в области химических наук и материаловедения» (2020-2022 гг.); 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.

Научные положения, выводы и рекомендации можно считать в достаточной степени обоснованными и достоверными.

Практическая значимость и апробация полученных результатов

В диссертации были разработаны модели скоростного индукционного нагрева, а также методики решения задач совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора. Эти разработки имеют широкие перспективы применения в производственных электротехнологических комплексах для оптимизации различных типов индукционных нагревательных установок. Предлагаемые методики и вычислительные технологии могут быть применены для термообработки широкого спектра деталей различного назначения. Таким образом, данные разработки вносят вклад в оптимизацию процессов термо-

обработки и повышение эффективности производства.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования подтверждается их использованием при разработке технологий поверхностной индукционной закалки ответственных изделий на АО «СМЗ» и при разработке программных комплексов для оптимизации и моделирования энергоэффективных режимов работы электротехнологических объектов в ГК «ИНФОПРО», а также внедрением в учебный процесс ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Результаты практического применения диссертационного исследования подтверждены соответствующими документами.

По результатам исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе: 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 — в изданиях, индексируемых наукометрическими базами Scopus и Web of Science.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание и результаты проведенных исследований соответствуют следующим пунктам паспорта 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, АСУЦ, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

Замечания

1. В работе отсутствует анализ возможностей применения предлагаемых методик решения задачи совместной оптимизации проект-

- ных решений и алгоритмов управления при выборе критериев оптимальности, отличных от рассматриваемого критерия максимальной точности нагрева.
2. В диссертации не обосновывается выбор оценки целевых множеств конечных температурных состояний в равномерной метрике.
 3. Не обоснован выбор толщины закаливаемого слоя (2 мм), хотя от нее существенно зависит сложность решения рассматриваемых в диссертации задач.
 4. В главе 5 недостаточно подробно описана реализация численного решения задач оптимизации с помощью разработанной численной процедуры, построенной на основе альтернативного метода.
 5. В разделе, посвященном программной и технической реализации, не приведены технические характеристики индукционной нагревательной установки. Среди предлагаемых технических средств показан пирометр, однако, не указано, где и как он используется.
 6. При постановке численной модели взаимосвязанных тепловых и термомеханических процессов некорректно указаны физические свойства стали 40 в диапазоне до температуры 2000 °С, некоторые из которых после температуры плавления при переходе в жидкое состояние теряют физический смысл.

Отмеченные недостатки не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку уровня диссертационных исследований и не снижают его ценности и значимости.

Общая оценка диссертации

Диссертация Павлушина А.В. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, обладающую научной новизной, актуальностью и практической значимостью.

Работа выполнена на высоком научном уровне, написана в форме, позволяющей получить достаточно полное представление о полученных автором результатах.

Автореферат достаточно полно отражает содержание и основные положения диссертационной работы.

Диссертационная работа соответствует Положению о присуждении учёных степеней, а соискатель Павлушин Алексей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процес-

сами и производствами.

Диссертация и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» 01 ноября 2023 г., протокол № 7.

Заведующий кафедрой автоматизированных электротехнологических установок,
д.т.н., профессор
E-mail: aialiferov@yandex.ru
Тел. 8-383-346-30-32

 Алиферов Александр Иванович

Подпись Алиферова А.И. удостоверяю:

*Взвешено
по персоналу*



 О. А. Хуторненко

Сведения о ведущей организации. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Адрес. 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел.: 8 (383) 346-08-43. Адрес электронной почты: rector@nstu.ru Сайт: <http://www.nstu.ru>