

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.377.04 (Д 212.217.07),  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 14 декабря 2023 г. № 11

О присуждении Павлушину Алексею Владимировичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Оптимальное проектирование и управление технологическим процессом нагрева под индукционную закалку изделий сложной геометрической формы» по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами принята к защите 10 октября 2023 г., протокол №5, диссертационным советом 24.2.377.04 (Д 212.217.07), созданным на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки РФ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, приказом Минобрнауки РФ № 1119/нк от 16 ноября 2017 г.

Соискатель Павлушин Алексей Владимирович, 1995 года рождения, в 2019 году окончил с отличием магистратуру по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и в этом же году поступил в очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, которую окончил в 2023 году. С 06.04.2020 по настоящее время работает ведущим специалистом по внедрению ООО «Группа Компаний ИНФОПРО». С 23.09.2020 по 31.12.2022 работал по совместительству инженером в НИС кафедры «Автоматика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки РФ.

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

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор Плешивцева Юлия Эдгаровна, профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки РФ.

**Официальные оппоненты:**

Душин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)», профессор кафедры «Автоматика и процессы управления», г. Санкт-Петербург;

Лепешкин Александр Роальдович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО

«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов», г. Москва

дали положительные отзывы на диссертацию.

#### **Ведущая организация -**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск в своем положительном заключении, подписанном А.И. Алиферовым (заведующий кафедрой автоматизированных электротехнологических установок, д.т.н., профессор) и утвержденном к.т.н., проректором по научной работе А.И. Отто указала, что диссертация представляет собой самостоятельную, завершённую научно-квалификационную работу, обладающую научной новизной, актуальностью и практической значимостью.

Соискатель имеет 13 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. Суммарный объем публикаций с участием соискателя составляет 7,79 печатных листов, объем работ, написанных единолично, составляет – 5,62 печатных листа.

#### **Наиболее значимые научные работы Павлушина А.В. по теме диссертации:**

1. Pleshivtseva, Y., Pavlushin, A., Popov, A., & Yevelev, A. (2023). Cyber-Physical Complex for the Optimal Design of Installation for Surface Hardening. In Cyber-Physical Systems Engineering and Control (pp. 137-147). Cham: Springer Nature Switzerland. (Авт. вклад 0,159 п.л.)

2. 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. (1,05 п.л.)

3. 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. (0,9625 п.л.)

4. 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. (1,05 п.л.)

#### **На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:**

1. Ведущей организации ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск. В отзыве приведены следующие замечания: в работе отсутствует анализ возможностей применения предлагаемых методик решения задачи совместной оптимизации проектных решений и алгоритмов управления при выборе критериев оптимальности, отличных от рассматриваемого критерия максимальной точности нагрева; не обосновывается выбор оценки целевых множеств конечных температурных состояний в равномерной метрике; не обоснован выбор толщины закаливаемого слоя; в главе 5 недостаточно подробно описана реализация численного решения задач оптимизации с помощью разработанной численной процедуры, построенной на основе альтернансного метода; не приведены технические

характеристики индукционной нагревательной установки, не указано, где и как используется пирометр; при постановке численной модели взаимосвязанных тепловых и термомеханических процессов некорректно указаны физические свойства стали 40 в диапазоне до температуры 2000 °С.

2. Официального оппонента д.т.н., профессора Душина Сергея Евгеньевича, в котором содержатся следующие вопросы и замечания: при описании разработанной в диссертации методики решения задачи совместной оптимизации не указывается, на каком этапе и как осуществляется процедура параметризации управляющих воздействий; требуется пояснение утверждения об упрощении управляющего воздействия на участке нарушения ограничений в виде ступенчато-постоянной функции путем ее аппроксимации с помощью непрерывной функции; неверно применен термин «предел упругости» при анализе термических напряжений на стр. 143; в главе 5 не представлены результаты оптимизационных расчетов с меньшим числом оптимизируемых параметров для  $\varepsilon_{\min}^{(5)}$ ,  $\varepsilon_{\min}^{(6)}$  и соответствующие температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя для детали сложной формы с радиусами 40 и 48 мм; в разделе 2.2 не обоснован выбор нелинейной зависимости коэффициента теплоотдачи для расчета стадии охлаждения, определяющего расход воды  $M=1.2 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ; в разделе 2.2.5 отсутствует информация о верификации численной модели процесса охлаждения.

3. Официального оппонента д.т.н., доцента Лепешкина Александра Роальдовича, в котором указаны следующие замечания: при постановке задачи совместного оптимального проектирования и управления индукционным нагревателем не приводится обоснование выбора оценки множества конечных состояний объекта с распределенными параметрами с помощью равномерной метрики; в работе не показано, как изменяются в процессе закалки пространственные координаты точки в пределах поверхностного слоя, в которой наблюдается максимальное значение термического напряжения; отсутствует описание устройства регулировки силы тока индуктора; не показана возможность распространения предлагаемых методик решения рассматриваемых задач на трехмерные (в том числе, несимметричные) модели объекта управления; в работе не указаны причины, по которым не получается еще больше снизить температурное отклонение вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева; в работе имеются мелкие опечатки и погрешности оформления.

#### **На автореферат диссертации поступили 7 отзывов от:**

д.т.н., профессора, профессора кафедры «Электротехника» В.Н. Тимофеева, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск; д.т.н., профессора, заведующего кафедрой «Компьютерные системы управления» Г.М. Мартинова, ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», г. Москва; д.т.н., доцента, заведующего кафедрой «Вычислительные системы и технологии» Института радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ) Д. В. Жевнерчука, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), г. Нижний Новгород; д.т.н., профессора, профессора кафедры «Автоматика и управление» Л.С. Казаринова, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск; д.т.н., профессора, профессора кафедры «Автоматика и процессы управления» Д.Х. Имаева, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)»,

г. Санкт-Петербург; д.ф.-м.н., профессора, профессора НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Г.В. Кузнецова, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск; д.т.н., профессора, профессора кафедры «Автоматика и телемеханика» В.И. Лачина ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» г. Новочеркасск.

В отзывах на автореферат замечания касаются вопросов: технологии процесса поверхностного индукционного нагрева изделий сложной геометрической формы под закалку; времени, необходимого для численного моделирования и оптимизации; факторов, от которых зависит максимально достижимая точность нагрева; связей между собой двух технологических ограничений; уточнения используемых терминов; верификации численной модели стадии нагрева; возможности применения разработанной общей методики и численных оптимизационных процедур для решения многокритериальной задачи оптимального проектирования и управления; выбора характерных точек для анализа температуры по линии границы закаливаемого слоя; ограничений на размерность вектора искомых параметров в задаче совместной оптимизации.

Все отзывы положительные, отмечают актуальность темы диссертации, научную новизну и практическую значимость основных положений работы, соответствие диссертационной работы Павлушина А.В. требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», указывается, что ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается многолетним опытом работы, высокой компетентностью и наличием публикаций, соответствующих тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** общая методика решения задач 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; методика и вычислительная технология решения на основе альтернативного метода задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой в условиях равномерной оценки целевого множества конечных температурных распределений вдоль границы упрочняемого слоя заготовки сложной геометрической формы;

**предложено** численное решение нелинейных задач управления на временных интервалах движения по фазовым ограничениям на максимально допустимые температуры и термонапряжения в закаливаемом слое заготовки сложной геометрической формы;

**предложены** численные итерационные процедуры для совместного решения задач оптимального проектирования конструктивных параметров и управления током индуктора, реализованные в пакете прикладных программ MATLAB;

**доказана** возможность существенного повышения равномерности температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя без перегревов поверхностных слоев и превышения допустимых значений термических напряжений за счет решения поставленных в диссертационном исследовании задач.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**доказано**, что задача совместной оптимизации проектных решений и режимов индукционного нагрева в процессе поверхностного упрочнения деталей сложной формы сводится в условиях равномерной оценки целевых множеств к специальной форме параметрической задачи полубесконечной оптимизации;

**применительно к проблематике диссертации результативно использованы:** методы теории оптимального управления системами с распределенными параметрами; методы теории теплопроводности, электромагнетизма и механики деформируемого твердого тела; методы численного и компьютерного моделирования;

**изложены** теоретические основы предлагаемых методик решения задач совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора и нелинейных задач управления нагревом на временных интервалах движения по фазовым ограничениям;

**раскрыты** проблемы и особенности предметной области, связанные с необходимостью разработки методик решения задач совместной оптимизации систем с распределенными параметрами в условиях равномерной оценки целевых множеств при учете технологических ограничений на поведение функции состояния;

**изучены** основные качественные и количественные закономерности поведения взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, полей термонапряжений в процессах нагрева и охлаждения при поверхностной закалке стальных заготовок с угловыми зонами, влияющие на качество формируемой микроструктуры;

**проведена модернизация** базовой схемы альтернансного метода решения задач оптимизации систем с распределенными параметрами, обеспечивающая распространение альтернансных свойств оптимальных решений на температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя сложной геометрической формы, рассматриваемой в виде пространственной развертки по одной условной координате.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** в проектные решения методики и вычислительные технологии оптимизации индукционных нагревательных установок в производственных электротехнологических комплексах, реализующих ответственные технологии термообработки широкой номенклатуры деталей различного назначения;

**определены** способы практического использования полученных в диссертации теоретических результатов с целью повышения качества процессов индукционного поверхностного упрочнения ответственных изделий сложной формы;

**создан** программный комплекс для реализации численных процедур оптимизации конструктивных и режимных параметров нагревательной системы для поверхност-

ного упрочнения стальных заготовок в пакете MATLAB с интегрированной в него нелинейной двумерной ANSYS-моделью процесса индукционного нагрева; **представлены** практические рекомендации по технической реализации алгоритма управления с учётом ограничения на максимальную температуру заготовки в процессе поверхностной индукционной закалки.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**теория** построена на известных и общепринятых научных положениях и методах; приведенные выводы и рекомендации подтверждаются корректным применением математического аппарата, результатами компьютерного моделирования, научным обоснованием принятых положений и допущений, подробным анализом и оценкой полученных результатов;

**идея базируется** на рассмотрении суммарного вектора оптимизируемых параметров повышенной размерности, представляющего совокупность векторов конструктивных и режимных параметров, что позволяет редуцировать исходную задачу к специальной задаче полубесконечной оптимизации, которая решается по разработанным методикам, основанным на альтернативном методе;

**использованы результаты** анализа работ отечественных и зарубежных авторов, экспериментальные исследования и численное моделирование;

**установлено**, что результаты численного моделирования процесса индукционной закалки не противоречат фундаментальным физическим законам и подтверждают правомерность принятых при моделировании допущений;

**использованы** современные программные средства для построения численных моделей и реализации итерационных оптимизационных процедур.

**Личный вклад соискателя** состоит в решении научных и технических задач на всех этапах выполнения диссертационной работы; постановке и решении задачи совместной оптимизации конструкции и режимов функционирования индуктора в процессе нагрева изделий сложной геометрической формы под поверхностную закалку с учетом технологических ограничений; разработке численных оптимизационных процедур с интеграцией численных моделей процесса нагрева; в личном участии в апробации результатов диссертационного исследования; в обработке и интерпретации данных, полученных лично автором; в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 1) недостаточно подробно описаны результаты экспериментальных исследований;
- 2) не приведены характеристики технических средств автоматизации, предлагаемых для реализации разработанной оптимальной программы управления током индуктора;
- 3) недостаточно подробно раскрыта процедура развертки двумерной границы закаливаемого слоя по одной условной координате;
- 4) не приведены результаты сравнения индукционной закалки с альтернативными способами упрочнения, например, с лазерной закалкой.

Соискатель Павлушин А.В. согласился с замечаниями, ответил на задаваемые ему в ходе

заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

На заседании №11 от 14 декабря 2023 года диссертационный совет принял решение за новые научно-обоснованные технологические решения и разработки в области оптимизации конструкции индукционного нагревателя и алгоритмов программного автоматического управления процессом нагрева под закалку изделий сложной формы, имеющие существенное значение для развития страны, присудить Павлушину Алексею Владимировичу учёную степень кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами за решение научной задачи, имеющей значение для развития теории оптимального проектирования и управления системами с распределенными параметрами, и техники ее применения к процессам поверхностного индукционного нагрева заготовок сложной геометрической формы под закалку.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов наук по научной специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: «за присуждение учёной степени» – 19, «против» – 0.

Председатель заседания  
диссертационного совета  
24.2.377.04 (Д 212.217.07)

Ученый секретарь диссертационного  
совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07)



Рогачев Геннадий Николаевич

Ярославкина  
Екатерина Евгеньевна

14 декабря 2023 г.