

ОТЗЫВ

официального оппонента Лепешкина Александра Роальдовича, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 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.

1. Актуальность диссертационного исследования

В диссертационном исследовании автор рассматривает важную проблему современной теории управления системами с распределенными параметрами, связанную с оптимизацией технологий термообработки индукционным способом, широко распространенных в машиностроении и обладающих неоспоримыми преимуществами по сравнению с конкурентоспособными технологиями. Актуальность этой проблемы связана с тем, что эти технологии предоставляют широкие возможности для создания специализированных форм и повышения качества и надежности ответственных изделий, востребованность которых постоянно возрастает в современном промышленном производстве. Отмечая основные достоинства закалки индукционным способом, к которым следует отнести высокую скорость и управляемость процесса, низкое окисление и обезуглероживание, экологическую безопасность и др., нельзя не отметить принципиальные трудности, связанные с обеспечением требуемой равномерности температурного распределения в конце стадии нагрева, особенно для изделий со сложной геометрией, характеризующейся труднодоступными зонами, выступами и углублениями. Типовые индукционные нагревательные установки и стандартные режимы их работы часто не способны обеспечить необходимую равномерность температурного поля, что существенно влияет на формирование однородной аустенитной структуры в закаливаемом слое таких изделий. Возникновение значительных температурных перепадов, локальных перегревов или недогревов отдельных участков приводит не только к образованию неоднородной микроструктуры, но и к повышенным термическим напряжениям, что негативно сказывается на качестве и эксплуатационных характеристиках деталей. Решение этих проблем

требует оптимизации конструктивных параметров оборудования и оптимального управления технологическими режимами его работы на основе новых подходов, предоставляющих дополнительные возможности и открывающих новые возможности электротехнологий, которые можно отнести к традиционным.

В связи с вышесказанным становится актуальной основная задача диссертационного исследования, которая посвящена поиску оптимальных конструктивных характеристик индукционных нагревательных установок и параметров, определяющих режимы их функционирования, которые обеспечивают получение требуемой равномерности температурного поля в упрочняемом поверхностном слое в конце стадии нагрева при отсутствии недопустимых локальных перегревов и термонапряженных состояний обрабатываемой заготовки L-образной формы.

2. Основные результаты, обладающие научной новизной

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.

Перечисляя пункты научной новизны следует отдельно отметить, что разработанная общая методика совместной оптимизации алгоритмов управления индукционной установкой и ее конструктивных параметров с учетом технологических ограничений позволяет получить решение задачи для различных случаев нарушения одного из рассматриваемых ограничений или обоих ограничений одновременно, что представляет особый интерес для возможных частных практических приложений. При этом следует отметить, что ограничение на максимально допустимые термонапряжения являются одним из наиболее сложно учитываемых в задачах оптимального управления. Однако, автор не только успешно справляется с этой задачей, но и решает ее в условиях, когда нарушение ограничений проверяется не только в точках, расположенных на границе упрочняемого слоя, но и во всех точках пространственной области от границы до поверхности заготовки. Это обеспечивает выполнение диктуемых технологическими требованиями условий отсутствия локальных перегревов и превышений допустимых термонапряжений по всему объему заготовки и на всем протяжении процесса.

Еще одной важной особенностью работы является рассмотрение границы закаливаемого слоя сложной формы в виде пространственной развертки по одной условной координате, что позволяет распространить альтернативные свойства оптимальных решений на температурные распределения вдоль этой границы для упрощения систем уравнений альтернативного метода, замкнутых относительно всех неизвестных.

3. Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием фундаментальных положений теории электродинамики и теплопроводности, механики деформируемого твердого тела, теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, численного и компьютерного моделирования.

Справедливость выводов и обоснованность проектных решений и алгоритмов управления подтверждается использованием автором результатов диссертационной работы при:

- выполнении проекта РФФИ (№19-08-00232, 2019–2021 гг.); выполнении проекта РНФ (№ 22–29–00180, 2022–2023 гг.); выполнении НИР №0778-2020-0005 (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» (г. Самара);

- разработке программных комплексов для оптимизации и моделирования энергоэффективных режимов работы электротехнологических объектов в ГК «ИНФОПРО» (г. Самара).

4. Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа Павлушина А.В. изложена в форме, позволяющей получить полное и подробное представление о проведенных исследованиях и полученных результатах. Состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Оформление диссертации соответствует установленным государственными стандартами требованиям. Все заимствования, имеющиеся в работе правомерны, что подтверждается приведенными библиографическими ссылками.

По результатам проведенных исследований автором опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 — в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 4 — в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science.

Опубликованные работы достаточно полно отражают основные результаты, полученные в рамках диссертационного исследования.

5. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Разработанные в диссертации модели и методики решения задач совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования могут быть использованы для оптимизации широкого спектра индукционных нагревательных установок в производственных электротехнологических комплексах.

Сравнительный количественный анализ показал, что решение поставленных в диссертационном исследовании задач на основе разработанных методик позволило повысить равномерность температурного распределения и обеспечить значительное снижение максимального температурного отклонения от заданной температуры вдоль границы закаливаемого слоя с $\pm 200^{\circ}\text{C}$ до $\pm 40.6^{\circ}\text{C}$ без перегревов поверхностных слоев в диапазоне температур, при которых формируется аустенитная микроструктура.

Предлагаемые методики и вычислительные технологии могут быть распространены на ответственные технологии термообработки широкой номенклатуры деталей различного назначения.

Научная и практическая значимость результатов работы подтверждается использованием полученных в диссертации положений, выводов и рекомендаций в НИР, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

6. Замечания по диссертационной работе

1. Основные методики и вычислительные технологии, разработанные в диссертации, основаны на использовании оценок множеств конечных состояний объекта с распределенными параметрами с помощью равномерной метрики, работа с которой представляет, как известно, значительные математические трудности и принципиально усложняет решение задач оптимизации. При этом при постановке задачи совместного оптимального проектирования и управления индукционным нагревателем не приводится обоснование выбора именно такой оценки.

2. В работе не показано, как изменяются в процессе закалки пространственные координаты точки в пределах поверхностного слоя, в которой наблюдается максимальное значение термического напряжения, однако возможность такого исследования была бы интересна с точки зрения

предсказания расположении и конфигурации области формирования возможной трещины.

3. Отсутствует описание устройства регулировки силы тока индуктора, которое позволило бы на практике с высокой степенью точности реализовать алгоритм управления с частотой изменения равной шагу моделирования.

4. В диссертации разработаны двумерные осесимметричные нелинейные численные модели. Могут ли предлагаемые методики решения рассматриваемых задач распространяться на трехмерные (в том числе, несимметричные) модели объекта управления?

5. В работе не указано (или не совсем очевидно сказано) по каким причинам не получается (что мешает) еще больше снизить температурное отклонение вдоль границы закаливаемого слоя в конце стадии нагрева?

6. В работе имеются мелкие опечатки и погрешности оформления, например, цветовые шкалы для обозначения распределений температур и термонапряжений не всегда сопровождаются достаточно подробной расшифровкой.

Отмеченные недостатки не снижают ценности исследований, представленных в диссертации.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней

Диссертационная работа Павлушина А.В. обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи разработки новых оптимизационных методик и процедур для проектирования и управления индукционными установками, предназначенными для поверхностной закалки ответственных изделий сложной формы.

Диссертационная 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, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

Считаю, что представленная диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК при Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Павлушин Алексей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент:

д. т. н., доцент, профессор

кафедры «Технология производства

и эксплуатации двигателей

летательных аппаратов»

ФГБОУ ВО «Московский авиационный


институт (национальный исследовательский

университет)»

Лепешкин Лепешкин Александр Роальдович

20.11.2023

Павлушин Алексей Владимирович завершил работу с журналом МАИ



Павлушин

Научная специальность, по которой защищена докторская диссертация:
05.09.10 – Электротехнология.

«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Контактный телефон: +7 499 110-16-71, +7 499 158-40-61, +7 499 158-10-44 (приемная комиссия).

Адрес электронной почты: mai@mai.ru.

Веб-сайт: www.mai.ru