

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента 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**

Диссертация А.В. Павлушина посвящена решению важной научно-практической задачи, направленной на повышение качества поверхностной индукционной закалки ответственных и востребованных металлических деталей сложной геометрической формы путем обеспечения максимально равномерного нагрева упрочняемого слоя на основе совместной оптимизации алгоритмов управления и конструкции индуктора.

Высокое качество поверхностной закалки индукционным способом достигается путем формирования равномерной микроструктуры в поверхностном слое после нагрева. Это зависит преимущественно от достижения требуемой равномерности распределения температуры по объему упрочняемого слоя и от обеспечения отсутствия локальных перегревов и недопустимых термонапряжений по всему объему заготовки. Усложнение геометрической формы заготовок при использовании типовой конструкции витков и типовых режимов функционирования индуктора приводит к недопустимым неравномерностям распределения температурных полей и полей термических напряжений, что существенно повышает сложность решения подобных задач. Особенно нетривиальной представляется задача обеспечения требуемой равномерности температурного распределения в угловых зонах и труднодоступных областях, в которых недопустимые температурные перепады в конце процесса нагрева становятся основным фактором, способным вызвать неоднородность мартенситной структуры упрочняемых деталей после процесса закалки.

Анализ взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, а также полей термических напряжений на различных стадиях процесса индукционной закалки стальных заготовок выполняется в диссертационном исследовании на основе численных двумерных нелинейных моделей систем «индуктор-заготовка» и «заготовка – устройство спрейерного охлаждения», разработанных в программной среде ANSYS Mechanical APDL.

Результаты моделирования показывают, что проблема формирования равномерных температурных распределений не может быть решена при использовании типовой формы витков индуктора и типовых режимов работы установки, сопровождающихся принципиально недопустимыми перегревами выступов и недогревами труднодоступных локальных зон заготовок.

В этой связи особую важность приобретает задача совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов работы индукционных нагревательных систем для поверхностной закалки деталей сложной геометрической формы на основе теории и техники оптимального управления системами с распределенными параметрами. Сказанное позволяет сделать вывод о том, что тема диссертации А.В. Павлушина, посвященная решению указанной задачи, является, безусловно, **актуальной**.

## **2. Анализ структуры и содержания работы**

Диссертационная работа А.В. Павлушина состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, список литературы содержит 126 наименований.

Рукопись диссертации оформлена согласно ГОСТ Р 7.01.11-2011 и ГОСТ 2-105. Диссертация отличается логической связностью, структура и содержание работы соответствуют целям и задачам исследования. Автореферат отвечает содержанию и отражает основные результаты диссертационной работы.

По результатам проведенных исследований автором опубликовано 13 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.

## **3. Научная новизна основных результатов и выводов диссертации**

В диссертационной работе соискателем были получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана универсальная методика для совместной оптимизации конструктивных характеристик индуктора и режимов управления индукционной установкой, применяемой в процессе поверхностной закалки. В отличие от существующих способов решения задач параметрической оптимизации объектов с распределенными параметрами, предлагаемая в диссертации методика:

- позволяет оптимизировать как конструкцию индуктора, так и параметры режима его работы с целью достижения максимально равномерного температурного распределения в поверхностном слое упрочняемых изделий, даже в случае их сложной формы;

- гарантирует соблюдение технологических требований, исключая возможность локальных перегревов и появление недопустимых термонапряжений в процессе нагрева.

2. На базе альтернативного метода оптимизации систем с распределенными параметрами разработаны методика и вычислительная технология решения задачи совместной параметрической оптимизации конструкции и алгоритмов управления индукционной установкой, которые позволяют найти суммарный вектор оптимизируемых параметров повышенной размерности, представляющий совокупность векторов конструктивных и режимных параметров. Разработанная методика существенным образом использует возможность распространения альтернативных свойств оптимальных решений на температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя сложной формы в конце процесса нагрева, для чего предлагается рассматривать пространственную развертку этого слоя по одной условной пространственной координате.

3. Разработана методика численного решения нелинейных задач управления на отдельных временных интервалах (называемых в диссертации “интервалами движения по ограничениям”), на которых обеспечивается отсутствие превышений температуры и допустимых значений термонапряжений в любой точке упрочняемого слоя заготовки и в любой момент времени.

4. В программном комплексе MATLAB построены итерационные оптимизационные процедуры, которые позволяют решать задачи совместного оптимального проектирования и управления индуктором с интеграцией численной модели, разработанной в среде ANSYS Mechanical APDL.

В диссертации отмечается универсальность применения разработанных методик и процедур для решения задач совместной оптимизации широкого класса индукционных нагревательных установок в производственных электро-технологических комплексах. Предлагаемые методики и вычислительные технологии могут быть распространены на технологии термообработки широкой номенклатуры ответственных деталей различного назначения.

В диссертации на основе совместного использования пакетов программ MATLAB и ANSYS разработан программный комплекс, позволяющий решать задачи оптимизации в различных постановках в рамках представленной в диссертации общей формулировки, что облегчает применение предлагаемых методик параметрической оптимизации для более широкого класса задач. Особенно важно, что все эти задачи могут быть сформулированы в условиях оценки целевых множеств конечных состояний в равномерной метрике, наиболее соответствующей большинству типовых технологических требований.



#### **4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Анализ практической апробации полученных результатов, направленных на повышение качества поверхностной закалки деталей сложной формы путем оптимизации параметров конструкции и режимов функционирования индукционных нагревателей, в полной мере согласуются с известными результатами в исследуемой предметной области. Разработанные соискателем научные положения, численные модели, выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Проведена верификация модели путем сравнения результатов моделирования стадии индукционного нагрева, полученных в ANSYS Mechanical APDL и в программном пакете Altair FLUX.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе научных результатов и выводов подтверждается корректным использованием методов теории теплопроводности, электромагнетизма, механики деформируемого твердого тела, оптимального управления системами с распределенными параметрами, численного моделирования.

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

Полученные в диссертационной работе результаты (проблемно-ориентированные численные модели, методики оптимального проектирования, алгоритмы оптимального управления, специализированные процедуры параметрической оптимизации, реализованные в среде MATLAB с интеграцией численной двумерной нелинейной модели процесса нагрева, разработанной в пакете ANSYS Mechanical APDL), имеют теоретическую и практическую значимость для проектирования электротехнологического оборудования и синтеза автоматических систем управления технологическими процессами термической обработки изделий индукционным способом.

Основные выводы и рекомендации диссертации были использованы:

- в ряде научно-исследовательских работ, выполненных при поддержке РФФИ, РНФ, Минобрнауки РФ;
- при разработке технологии поверхностной индукционной закалки на металлургическом предприятии АО «СМЗ»;
- при разработке программных комплексов для оптимизации, моделирования энергоэффективных режимов работы электротехнологических объектов и расчета их технико-экономических характеристик ГК «ИНФОПРО»;
- при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в ФГБОУ ВО «СамГТУ».

## 6. Замечания по диссертационной работе

По диссертации имеются вопросы и замечания

1. При описании разработанной в диссертации методики решения задачи совместной оптимизации конструктивных параметров и режимов функционирования индуктора не указывается, на каком этапе и как осуществляется процедура параметризации управляющих воздействий.

2. Требуется пояснение утверждения о том, что «найденное управляющее воздействие на участке нарушения ограничений в виде ступенчато-постоянной функции при необходимости можно упростить путем аппроксимации с помощью непрерывной, например, полиномиальной функции» (стр. 96). Каким образом аппроксимация полиномиальной функцией позволяет упростить управляющее воздействие на указанном участке?

3. Неверно применен термин при анализе термических напряжений на стр. 143: «При этом термические напряжения не превышают предел *упругости* в 335 МПа». Очевидно, что в данном контексте имеется в виду «предел *текучести*».

4. 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  $R1=40$  мм и  $R2=48$  мм.

5. В разделе 2.2 для расчета стадии охлаждения применяется нелинейная зависимость коэффициента теплоотдачи для параметра, определяющего расход воды  $M=1.2$  м<sup>3</sup>/(с\*м<sup>2</sup>), однако, не обоснован выбор численного значения этого параметра.

6. В разделе 2.2.5, в котором представлены результаты численного моделирования стадии охлаждения, отсутствует информация о верификации численной модели, с помощью которой были получены данные результаты.

Перечисленные замечания не снижают научно-практической ценности выполненной исследовательской работы.

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

Результаты и выводы в диссертационной работе Павлушина А.В. соответствуют сформулированным целям и поставленным задачам. Теоретические и практические результаты исследования направлены на повышение качества выпускаемой продукции за счет обеспечения равномерного поверхностного

упрочнения стальных изделий без образования локальных перегревов и превышения пределов термических напряжений в обрабатываемых деталях сложной конфигурации (с углообразными зонами).

Диссертация представляет собой актуальную и законченную научно-квалификационную работу, содержащую обоснованные результаты исследований. В диссертационном исследовании представлен достаточный объем результатов, обладающих научной новизной и практической ценностью. Основное содержание работы полностью отражено в автореферате и опубликованных статьях.

Диссертация отвечает предметной области научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

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 доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Автоматики и процессов управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Душин Сергей Евгеньевич

Подпись профессора Душина Сергея Евгеньевича, удостоверяю.

ПОДПИСЬ  
НАЧАЛЬНИКА  
Т.М. Р.



Докторская диссертация защищена по специальности  
05.13.01 «Управление в технических системах»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Адрес: 197376, г. Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5.

Контактный телефон: +7(812)346-44-87, контактный факс:

Адрес электронной почты: [root@post.etu.spb.ru](mailto:root@post.etu.spb.ru). Веб-сайт: <http://www.eltech.ru>