

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе  
Д.Т.Н., доцент



С.В. Брованов

\_\_\_\_\_ 2020 г.

### **Отзыв ведущей организации**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) на диссертационную работу Попова Антона Валерьевича «Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)»

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

Развитие современной промышленности и неизменная тенденция к повышению эффективности производственных процессов обуславливают необходимость внедрения новых и оптимизации существующих режимов функционирования технических систем. К подобным системам относятся системы индукционного нагрева металла перед операциями пластической деформации, поверхностного упрочнения валов, шестерней, лопаток турбин и т.д.

Конечной целью процесса поверхностной индукционной закалки, который выступает в роли объекта исследования рассматриваемой диссертационной работы, является получение требуемых микроструктурных свойств в закаливаемом слое обрабатываемой заготовки с целью повышения прочности, сопротивления изнашиванию и усталостному разрушению.



Однородность микроструктурных свойств получаемого упрочнённого слоя детали существенным образом зависит от результирующего распределения температуры по окончании стадии нагрева, равномерность которого не всегда обеспечивается при использовании типовых индукционных нагревательных установок и их режимов функционирования.

В связи с вышесказанным, актуальной и значимой становится задача поиска новых проектных решений по оптимизации конструктивных параметров нагревателей и алгоритмов управления процессами нагрева, являющаяся центральной в представленном диссертационном исследовании.

### **Структура и содержание работы**

В *первой* главе рассматриваются промышленные технологии термической обработки стали, описана технология поверхностной индукционной закалки стальных заготовок, а также сформулирована общая задача оптимизации индукционной нагревательной установки как объекта с распределенными параметрами.

Во *второй* главе формулируются задачи оптимизации конструкции нагревателя для поверхностного упрочнения стальных цилиндрических изделий, как для случая полной информации об объекте, так и для ситуации, когда основные параметры стадии нагрева заданы с точностью до диапазона их возможных значений. Рассматривается постановка задачи оптимального по быстродействию управления с фазовым ограничением на максимальную температуру детали, её параметризация и редукция к задаче математического программирования. Предлагаются оригинальная методика решения сформулированных задач оптимизации конструкции индуктора, а также новый алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления с учётом фазового ограничения на максимальную температуру заготовки.

В *третьей* главе рассматривается процесс построения численной модели стадии нагрева процесса поверхностного упрочнения в программном пакете Altair FLUX. Проводится валидация разработанной модели с помощью сравнения результатов численного расчёта с результатами эксперимента на лабораторной нагревательной установке. Предлагается специализированная автоматизированная процедура параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной системы для процесса поверхностного упрочнения стальных изделий, разработанная в пакете MATLAB с интегрированной конечно-элементной двумерной FLUX моделью.



В *четвёртой* главе приведены и проанализированы результаты численного решения сформулированных задач оптимального проектирования индуктора, полученные с помощью предложенной автоматизированной оптимизационной процедуры.

### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Автором получен ряд новых научных результатов, которые расширяют теоретические представления и на качественно более высоком уровне позволяют решать задачу оптимального проектирования и управления режимами индукционного нагрева.

К числу основных научных результатов работы Попова А.В. можно отнести следующие:

1. Разработана новая методика решения задачи оптимизации конструкции индукционного нагревателя для поверхностного упрочнения стальных деталей, обеспечивающая максимально равномерный нагрев упрочняемого слоя обрабатываемого изделия. Предложенная методика используется при решении задачи оптимального проектирования как при наличии полной информации об объекте, так при интервальной неопределенности основных характеристик исследуемой стадии нагрева поверхностной закалки.
2. Разработан новый алгоритм решения задачи оптимального по быстродействию управления при наличии дополнительного фазового ограничения на максимальную температуру детали в течение первой стадии процесса закалки. Предложенный алгоритм, в отличие от известных, позволяет обеспечить максимальную скорость нагрева обрабатываемого поверхностного слоя изделия без локальных перегревов его отдельных участков.
3. Разработана специализированная процедура параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной установки в численном пакете MATLAB с интегрированной конечно-элементной многомерной FLUX моделью, которая позволяет сократить вычислительные ресурсы, необходимые для решения задач оптимального проектирования и управления процессами индукционного нагрева.

### **Достоверность результатов работы**

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе основных научных положений, выводов и рекомендаций



подтверждается корректным использованием математического аппарата, методов численного моделирования и теории оптимального управления системами с распределенными параметрами.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, использовались при выполнении финансируемых научно-исследовательских работ в рамках базовой и проектной частей государственного задания (проекты №2014/199, №520/17, №0778-2020-0005), а также по проектам РФФИ (№16-08-00945, №19-08-00232).

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

### **Практическая значимость и апробация полученных результатов**

Полученные в диссертационной работе методика решения задач оптимизации конструкции индукционного нагревателя для поверхностного упрочнения стальных деталей, а также алгоритм решения задачи оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру заготовки имеют практическую ценность. На их основе в диссертации разработана специализированная автоматизированная процедура параметрической оптимизации, которая за счёт своей универсальности может быть использована при проектировании нагревательных систем для поверхностной индукционной закалки различного исполнения.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования также подтверждается их использованием в АО «Арконик СМЗ» и 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», 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах».

Результаты практического применения диссертационного исследования подтверждены соответствующими документами.

По результатам исследований опубликовано 12 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 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и



производствами (технические системы): п.10 «методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСПП и др.», п. 13 «теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надёжности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главе 1 следовало больше уделить внимания особенностям технологии поверхностной индукционной закалки цилиндрических заготовок, изготовленных из конструкционной стали С40, исследуемой в диссертационной работе.
2. При описании общей задачи оптимизации индукционного нагревателя для поверхностной закалки (глава 1) указаны два фазовых ограничения, а именно: на максимальную температуру заготовки в процессе нагрева и на максимальную величину растягивающих термонапряжений. Следовало более аргументировано пояснить, почему при постановке задачи оптимального по быстродействию управления в разделе 2.1.2 использовано только одно ограничение - на максимальную температуру изделия.
3. Валидация разработанной нелинейной двумерной численной модели осуществляется путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке (глава 3). Однако в 4 главе рассматривается модель с отличающимися геометрическими параметрами, для которой справедливость использования модели в оптимизационных процедурах без дополнительных пояснений неочевидна.
4. В разделе 4.2 сравниваются результаты решения задачи оптимального проектирования с помощью двух методов оптимизации: альтернативного метода и метода AGDEMO. Неясно, зачем здесь приводить значительно уступающие им по точности нагрева результаты, полученные методом M-NSGA (таблица 4.5, стр. 113).
5. В тексте диссертации встречаются опечатки. Например, на с. 13 ошибочно указано число библиографических источников в списке литературы; на с. 54-55 абзац, начинающийся со слов «взаимосвязанная система уравнений...», повторяется два раза.

Отмеченные недостатки не оказывают существенного влияния на оценку общего уровня диссертационных исследований.



## Заключение

Диссертация Попова А.В. представляет собой самостоятельную, завершённую научно-квалификационную работу, обладающую признаками новизны, актуальности и практической значимости. Она написана грамотным профессиональным языком, имеет завершённый характер и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Автореферат достаточно полно отражает содержание и основные положения диссертации.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждено Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в редакции от 01.10.2018 г.), а ее автор, Попов Антон Валерьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы).

Диссертация и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Автоматика» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» 19 ноября 2020 г., протокол № 8/1.

Заведующий кафедрой автоматике,  
д-р техн. наук, доцент  
E-mail: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)

Жмудь Вадим Аркадьевич

Профессор кафедры автоматике,  
д-р техн. наук, доцент  
E-mail: [frants@ac.cs.nstu.ru](mailto:frants@ac.cs.nstu.ru)

Французова Галина Александровна

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

Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Тел.: 8 (383) 346-08-43.

Адрес электронной почты: [rector@nstu.ru](mailto:rector@nstu.ru) Сайт: <http://www.nstu.ru>

Подписи В.А. Жмудя и Г.А. Французовой удостоверяю



Г.А. Французова