

## ОТЗЫВ

официального рецензента, доктора технических наук Попова Андрея Юрьевича на диссертационную работу Ратушной Татьяны Юрьевны на тему «Разработка инновационной технологии восстановления лопаток сложной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ с применением высококонцентрированных источников плазменной энергии», представленную на соискание ученой степени доктор философии (PhD) по специальности 6D071200 - Машиностроение

**Актуальность темы исследования и ее связь с общенаучными и общегосударственными программами.**

Мировые достижения ремонтно-восстановительного производства наукоемкой отрасли тяжелого машиностроения направлены на развитие энергетических комплексов любой страны. Особый интерес для мировых держав в области тяжелого машиностроения представляют стратегические объекты, такие как ТЭЦ и ГЭС. Повышение их энергоэффективности и производительности зависит от долговечности и безотказной работы турбинного агрегата. Исследования доказывают, что повышение ресурсной долговечности лопаток турбины с применением технологии восстановления высококонцентрированными источниками плазменной энергии является наиболее перспективным и эффективным способом. На сегодняшний день восстановление физико-механических свойств материала на структурном уровне лопатки турбины является актуальной задачей.

Представленные в диссертационной работе исследования направлены на разработку инновационного технологического процесса восстановления некондиционных лопаток турбин ТЭЦ путем модификации структуры поверхности плазменными источниками энергии и применения модернизированной конструкции плазмотрона. Для оценки качества свойств восстановленной поверхности разработана интегрированная методика оценки качества и сформирована база данных структурно-фазовых состояний детали в зависимости от режимов восстановления.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью системного подхода к повышению эффективности восстановительных работ в секторе машиностроения и энергетики – стратегического элемента стабильного экономического развития государства.

Научные исследования, представленные в диссертационной работе, проводились в рамках грантового финансирования МОН РК (государственная регистрация 0115РК01226) на тему: «Разработка и внедрение энергоэффективной технологии восстановления лопаток сложной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ высококонцентрированными источниками плазменной энергии с адаптивной системой управления процессами»

## **Научные результаты и их обоснованность.**

Цель диссертационной работы, сформулированная автором – разработка инновационной технологии восстановления некондиционных лопаток сложной проектной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ высококонцентрированным плазменным источником энергии, позволяющей повысить ресурс и производительность турбины.

Поставленные в работе задачи докторантом были успешно решены.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников, приложений. В конце каждого раздела описаны научно значимые, логично аргументированные выводы.

Введение содержит сведения об актуальности исследования, цель и задачи исследования, также представлены научная новизна работы, практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора в проведенную работу и перечень опубликованных научных трудов.

В первом разделе докторантом проведен полный аналитический обзор условий работы лопаточного аппарата. Проведен детальный анализ отказов и обоснованы критерии оценки тяжести последствий отказов с применением методики FMEA-анализа. Также представлены результаты исследований достижений современных технологий восстановления лопаток турбин.

Во втором разделе проведено математическое описание динамических процессов, протекающих в турбине ТЭЦ, для этого исследованы факторы и определены силы, действующие в динамической системе «пар-лопатка-турбина». Результаты исследований позволили усовершенствовать математическую модель динамических процессов описывающую влияние циклически действующих динамических нагрузок в разные интервалы времени в зависимости от режимов эксплуатации и дефектов проектной геометрии лопаток вследствие коррозионно-эрозионных и вибрационных процессов. По результатам анализа показателей эксплуатации турбины разработана система критериев для глубокой технической оценки надежности основных элементов турбины.

В третьем разделе представлены результаты экспериментального исследования. Проведено имитационное моделирование восстановленных лопаток турбин в среде SolidWorks. По результатам исследования напряжений возникающих в лопатке установлено, что основная нагрузка приходится от середины сечения пера лопатки до верхнего торца и входной кромки. С увеличением плеча воздействия нагрузки возрастают растягивающие или сжимающие напряжения (1 – растяжение 0,000060 - 0,000074 МПа; 2 – сжатие 0,000041 - 0,0000697 МПа. В сечениях лопатки без нагрузки – растяжение 0,000004 - 0,000014 МПа). В ходе эксперимента установлено, что применение предложенного алгоритма имитационного моделирования методом конечных точек, позволяет с высокой вероятностью, определять зоны концентрации напряжений с удовлетворительной

сходимостью с расчетами математической модели динамических нагрузок в лопатках турбин.

В четвертом разделе разработана инновационная методика оценки качества восстановленных лопаток сложной геометрии. Предлагаемая методика позволяет своевременно определять лопатки турбин, которые работают с зонами концентрации напряжений от  $76 \pm 1,82$  до  $80 \pm 2,4$  А/м в перлитной фазе, т. е. на критической стадии предразрушения зерен структуры материалов. Обоснованы оптимальные значения напряженности ( $H_x = 54 \pm 1,42$  А/м) магнитного поля обеспечивающие безотказную работу лопаток с высоким ресурсным запасом прочности. Разработан алгоритм проведения диагностики лопаток с использованием методов неразрушающего контроля, который синтезирует взаимодействие метрологического оборудования и методической составляющей применения математического аппарата, что повышает точность оценки и прогнозирования остаточного ресурса лопаток и турбины в целом.

В пятом разделе разработан инновационный технологический процесс восстановления некондиционных лопаток турбин ТЭЦ методом «имплантация» с применением плазменной энергии. Для более эффективной реализации разработанного технологического процесса модернизирована конструкция плазмотрона путем введения в систему газовоздушного тракта трехзаходного вихревого смесителя, позволяющего управлять физико-механическими свойствами получаемой поверхности в процессе напыления в реальном режиме времени.

В заключении диссертационной работы подведен общий итог основных результатов исследований, имеющих теоретическую и практическую значимость.

В итоге докторантом получены следующие научные результаты:

- Разработана методика и алгоритм выбора технологии восстановления некондиционных лопаток турбин ТЭЦ, а так же обоснованы показатели качества технологического процесса за счет модификации структурно-фазовых приращений в материале мартенситного и аустенитного классов.
- Разработана методика интегрированной оценки качества восстановленных лопаток и сформирована база данных, позволяющая определять зоны формирования напряжений в фазовой структуре лопатки турбины и установить причинно-следственную связь зарождения и развития скрытых дефектов в прогнозируемый период времени  $f(t)$ .
- Разработаны алгоритм и инновационная технология плазменного восстановления механических свойств структуры материала и проектной геометрии некондиционных лопаток турбин ТЭЦ на основе внедрения имплантата.
- Модернизирована конструкция плазмотрона путем введения трехзаходного вихревого смесителя, обеспечивающего возможность дозировать многокомпонентные порошковые смеси и управлять физико-механическими свойствами получаемого покрытия.

**Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (научного положения), выводов и заключения докторанта, сформулированных в диссертации.**

Выводы по разделам диссертации являются обоснованными и базируются на результатах исследований.

Степень обоснованности и достоверность научных положений диссертационного исследования подтверждается корректным применением математического аппарата и апробированных методов обработки и анализа информации.

**Степень новизны каждого научного результата (положения), вывода докторанта, сформулированных в диссертации.**

В диссертационной работе Ратушной Т.Ю.:

- впервые обоснованы критерии оценки тяжести последствий случайных дефектов лопаток турбин и установлены зависимости эффективного изменения вырабатываемой энергии от удельных затрат на восстановление последствий отказа при эксплуатации;
- усовершенствована математическая модель динамических процессов при нестабильных моментах инерции для каждого сечения лопатки турбины с учетом распределения усталостных напряжений, приводящих к изменениям проектной геометрии вследствие эрозионных и коррозионных процессов в реальных условиях эксплуатации;
- впервые установлены зависимости, описывающие влияние технологических режимов восстановления на изменение физико-механических свойств основы детали и покрытия, а также модификацию фазовой структуры лопаток турбин;
- обоснованы оптимальные конструктивно-технологические параметры плазменного восстановления некондиционных лопаток при внедрении имплантата.

Новизна полученных результатов в полной мере подтверждается их публикацией в научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus (две статьи), журналах рекомендованных ККСОН МОН РК (четыре статьи) и докладами и тезисами на научных конференциях различного уровня.

**Практическая и теоретическая значимость научных результатов.**

Предложенные автором алгоритм инновационного технологического процесс, модернизированная конструкция плазмотрона и интегрированная методика оценки качества восстановленных лопаток турбин ТЭЦ может рассматриваться в качестве отличительной черты представленного диссертационного исследования, а разработанный инновационный технологический процесс может быть применен для совершенствования технологии восстановления лопаток сложной геометрии в различных отраслях.

Кроме того, практическая и теоретическая значимость научных результатов диссертационного исследования Ратушной Т.Ю. подтверждается актами внедрения алгоритма инновационного технологического процесса и модернизированной конструкции плазмотрона на ТОО «Ремплазма», г. Петропавловск.

### **Замечания, предложения по диссертации**

1. Первая глава диссертации перегружена информацией по классификации, способам обнаружения дефектов, технологий восстановления лопаток турбин и методикам прогнозирования. Данный материал следовало бы представить в виде приложений.
2. Вопросы выбора и применения материалов для восстановления лопаток турбин рассмотрены поверхностно, марки выбранных порошковых композиций следовало бы рассмотреть более подробно.
3. В главе 4, таблица 4.4 не совсем понятно, каким образом применим метод неразрушающего контроля была установлена связь между напряженностью материала и его фазовой структурой.

Приведенные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основных положений и научных результатов работы и не снижают ценности диссертационного исследования Ратушной Т.Ю.

### **Соответствие содержания диссертации требованиям Правил присуждения ученых степеней**

Диссертационная работа Ратушной Татьяны Юрьевны на тему «Разработка инновационной технологии восстановления лопаток сложной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ с применением высококонцентрированных источников плазменной энергии» имеет научную новизну, практическую ценность и теоретическую значимость и в полном объеме отвечает требованиям правил присуждения ученых степеней Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора философии (PhD), а диссертант Ратушная Т.Ю. заслуживает присуждения ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071200 – «Машиностроение».

Официальный рецензент:  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Металлорежущие  
станки и инструменты» ФГБОУ  
ВПО ОмГТУ  
Адрес: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11  
Тел.: (3812) 65-24-39  
e-mail: popov\_a\_u@list.ru

Попов  
Андрей Юрьевич

