

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы ратушной Татьяны Юрьевны
«Разработка инновационной технологии восстановления лопаток сложной
геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ с применением
высококонцентрированных источников плазменной энергии»,
представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD)
по специальности: 6D071200 - «Машиностроение»

Актуальность работы. Мировые достижения наукоемких отраслей являются фундаментальными основами для трансферта технологий и развития интеллектуального потенциала страны. Особый интерес для мировых держав в области энергетики и тяжелого машиностроения представляют стратегические объекты, такие как ТЭЦ и ГЭС. Повышение их энергоэффективности, производительности и обеспечение безаварийной работы на сегодняшний день составляют основу индустриально-технологического развития Казахстана.

Согласно статистическим данным энергетические мощности ведущих стран Таможенного союза и Европы обеспечивают более 600 ТЭЦ и ГЭС, на долю Казахстана приходится около 53 единиц. Алматинскую область обеспечивает тепло- и электроэнергией ГЭС, построенная на реке Чарын, также в перспективе ввод в эксплуатацию ГЭС на озере Балхаш. В программе энергетического развития страны, совместно с иностранными инвесторами, в г. Актау планируется строительство атомной электростанции. Фонд изношенных турбоагрегатов действующих ТЭЦ и ГЭС в Республике составляет около 67%. Тенденции изменения ценовой политики на энергоресурсы, ремонт и обслуживание подвержена влиянию мировых монополистов. Проблему зависимости от других стран можно решить только развитием стратегии импортозамещения за счет развития восстановительного производства путем разработки энергоэффективной плазменной технологии реновации некондиционных (в настоящее время выбраковываемых) лопаток турбин ТЭЦ.

Рынок восстановительных и диагностических услуг беден на предложения качественной оценки восстановленных деталей энергетических станций в силу жестких требований. Казахстанские ТЭЦ и ГЭС являются стратегическими объектами, и участвовать в конкурсе на диагностирование и прогнозирование зарубежные фирмы не всегда имеют возможность, а если проходят по требованиям, то запрашивают высокую цену, не сопоставимую с качеством.

Широкий диапазон предлагаемых способов и технологий восстановления, как правило, основан на термодинамическом воздействии с введением в сварочную ванну флюсов и присадок. Известно, что любая термическая операция неизбежно влечет образование внутренних напряжений металла, величина которых зависит от коэффициента термического расширения.

Указанные факторы оказывают влияние на модификацию физико-механических свойств формируемого покрытия, и приводит к деградации первоначальной фазовой структуры. Основные способы повышения их

качества описаны ведущими учеными Клубника В.С., Костикова В.И., Шестерина Ю.А., Лащенко Г.И. и др. внесшими весомый вклад в развитие сварочных технологий. Однако, существующие технологии, направлены на восстановление геометрических параметров деталей и механических свойств их поверхности. Из предыдущих работ установлено, что динамическую нагрузку циклического действия воспринимает основа детали, а ее поверхность реагирует на воздействие агрессивной среды. На сегодняшний день, несмотря на достижения в области технологий восстановления недостаточно исследовано направление по способу формирования оптимальной фазовой структуры лопаток турбин из сталей аустенитного и мартенситного классов. Следовательно, стоит научная проблема в формировании базы знаний и установлении зависимостей влияния концентрации внутренних напряжений на фазовый состав структуры при различной вариации технологических режимов восстановления.

Технические аварии, произошедшие на ряде ГЭС и ТЭЦ, показали острый дефицит технологий неразрушающего контроля качества восстановленных энергоагрегатов и прогнозирования ресурса эксплуатации. Существующие методики диагностики направлены на обнаружение уже сформировавшихся дефектов и, как правило, в верхних слоях поверхности детали. В силу многообразия видов дефектов, средства измерений не всегда правильно их идентифицируют. Иногда концентрацию группы мелких дефектов приборы определяют как единый, что усложняет оператору их интерпретацию и повышает область неопределенности.

Комплекс исследований ведущих отечественных и зарубежных ученых показал, что для эффективного прогнозирования ресурса высоконагруженных агрегатов недостаточно базы знаний дефектов поверхностных слоев. В связи с чем, формируется сложная научно-техническая задача по исследованию процесса их на стадии зарождения в структуре основы материала лопатки. Научная проблема заключается в установлении и обосновании зависимости влияния фазовой структуры лопатки на скорость образования микротрещин и установления их причин.

Решить данную задачу предлагается путем модернизации метода диагностики скрытых дефектов в структуре материала на основе магнитоупругого эффекта и использования полей вихревых токов. Главная проблема заключается в том, что отсутствует методика идентификации зон локализации остаточных напряжений и установления пределов механических напряжений вследствие дефекта, характеризующегося физической несплошностью металла лопатки. Решить данную проблему предлагается путем обоснования физического смысла энергетического критерия оценки состояния равновесности магнитных полей. На сегодняшний день в практике машиностроения при дефектоскопии используется частный показатель математической производной напряженности ОМП. Принудительно созданное магнитное поле не коррелирует, и не отражает прямую зависимость от деформированного состояния и структурно – фазового состава металла. Также одна из научных проблем заключается в отсутствии обоснованной степени

воспроизводимости результатов измерительного эксперимента. В этом основной недостаток методологии анализа магнитограмм ОМП в методе MFL.

Привлекательность диссертационного исследования повышается за счет внедрения энергоэффективной технологии восстановления некондиционных лопаток турбин путем «имплантации» рабочей части лопатки за счет применения высококонцентрированных источников лазерно-плазменной энергии. Эффективность неразрушающего контроля и оценки качества физико-механических свойств восстановленных лопаток достигается за счет внедрения интегрированной методики комплексной оценки структурных параметров.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка инновационной технологии восстановления некондиционных лопаток сложной проектной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ высококонцентрированным плазменным источником энергии, позволяющей повысить ресурс и производительность турбины.

Задачи исследования.

- обосновать критерии оценки тяжести последствий случайных дефектов лопаток турбин и установить зависимости определяющие пределы эффективного изменения энергии вырабатываемой турбиной от удельных затрат на восстановление последствий отказа с адаптацией к условиям эксплуатации;
- усовершенствовать математическую модель динамических процессов в системе «пар-лопатка-турбина»;
- провести имитационное моделирование и исследовать восстановленные лопатки турбин ТЭЦ на концентрацию внутренних напряжений и вибрационную надежность в ПО Solid Works;
- разработать и адаптировать методику интегрированной оценки качества восстановления лопаток турбин ТЭЦ;
- обосновать критерии качества и разработать алгоритм выбора технологии восстановления некондиционных лопаток сложной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ, высококонцентрированным источником плазменной энергии;
- установить зависимости изменения структурно-фазовых составляющих от параметров технологического процесса плазменного восстановления некондиционных лопаток;
- разработать инновационный технологический процесс восстановления некондиционных лопаток турбин ТЭЦ плазменным напылением.

Объект исследования – технологический процесс восстановления некондиционных лопаток сложной геометрии паровых турбоагрегатов высококонцентрированным источником плазменной энергии.

Предмет исследования - зависимости изменения структурно-фазовых составляющих материала от параметров технологического процесса плазменного восстановления лопаток сложной геометрии паровых и газовых турбин ТЭЦ.

Методы исследования. Предполагается широкое применение аналитических и математических методов, метода многофакторного

эксперимента, методов имитационного и схемотехнического моделирования, разработка и проектирование экспериментальных образцов, макетирование, отработка технических решений на макетах и испытаний в производственных условиях на Казахстанских ТЭЦ.

Научная новизна диссертации заключается в следующих положениях и результатах:

- обоснованы критерии (S, O, D, RPN) оценки тяжести последствий случайных дефектов лопаток турбин и установлены зависимости ($RPN_S=0,0004(RPN)^2+0,0026(RPN)+2,9779$; $P=-23,42\ln W+140,45$; $S=1,6666\ln W+0,4897$) эффективного изменения вырабатываемой энергии от удельных затрат на восстановление последствий отказа при эксплуатации;
- усовершенствована математическая модель динамических процессов при нестабильных моментах инерции J'_η и J'_ξ для каждого напряженного сечения лопатки турбины с учетом усталостных напряжений изменения проектной геометрии вследствие эрозионных и коррозионных процессов в реальных условиях эксплуатации;
- предложена имитационная модель исследования лопаток турбин ТЭЦ на концентрацию внутренних напряжений и вибрационную надежность, а также обоснованы предельно допустимые значения растягивающих и сжимающих напряжений в основных зонах деформации лопаток: 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;
- 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.

Практическая значимость работы. Разработанный алгоритм и технология восстановления некондиционных лопаток турбин ТЭЦ методом имплантации позволяет расширить номенклатуру восстанавливаемых деталей и обеспечить восстановление структуры высоконагруженных деталей, что значительно повысит эффективность работы турбин ТЭЦ, при этом снижая себестоимость получаемой электроэнергии. Разработана методика интегрированной оценки качества 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 $f(t)$.

Разработана методика и алгоритм выбора технологии восстановления некондиционных лопаток турбин ТЭЦ, а так же обоснованы показатели качества технологического процесса за счет модификации структурно-фазовых превращений в материале мартенситного и аустенитного классов. Разработана технология восстановления структуры и проектной геометрии некондиционных

лопаток турбин ТЭЦ на основе внедрения имплантата и модернизирована конструкция плазмотрона путем введения трехзаходового вихревого смесителя, обеспечивающего возможность дозировать многокомпонентные порошковые смеси, управляя физико-механическими свойствами покрытия.

Модернизированная конструкция плазмотрона позволяет при плазменном напылении использовать различные составы сложных порошковых смесей. Внедрение разработанного смесителя плазмотрона обеспечивает возможность управления режимными параметрами при гибком подходе в формировании физико-механических свойств тем самым повышать качество получаемого покрытия и контролировать коэффициент термического расширения в восстановленных деталях.

Предложенная интегрированная методика оценки качества восстановленных лопаток турбин ТЭЦ позволяет своевременно определять дефекты на структурно-фазовом уровне материала лопатки на ранней стадии их зарождения и прогнозировать их остаточный ресурс с учетом действующих динамических и вибрационных нагрузок.

Связь с государственными программами.

Основные результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, получены в ходе реализации грантового научного проекта, выполненного по заказу 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», где диссертант являлся участником исследовательской группы.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- Обоснованные критерии оценки тяжести последствий ($d_p \leq 0,5$ мм, $\sigma_{-1} = 40 \cdot 10^6$ Н/м², $a_\sigma = 1 \pm 0,05$, $P = 95$ МВт, $W = 23$ млн.тг) случайных дефектов лопаток турбин и зависимости определяющие пределы эффективного изменения энергии вырабатываемой турбиной в зависимости от удельных затрат на восстановление последствий отказа.
- Усовершенствованная математическая модель динамических процессов в системе «пар-лопатка-турбина» с учетом изменения проектной геометрии вследствие эрозионных, коррозионных и усталостных процессов в реальных условиях эксплуатации.
- Методика интегрированной оценки качества восстановления структуры лопаток турбин ТЭЦ и прогнозирования отказов нагруженных деталей на стадии предразрушения.
- Зависимости, описывающие влияние технологических режимов восстановления на изменение физико-механических свойств основы детали и покрытия.
- Оптимальные конструктивно-технологические параметры плазменного восстановления некондиционных лопаток при внедрении имплантата.

– Инновационный технологический процесс восстановления структуры и проектной геометрии некондиционных лопаток турбин ТЭЦ

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на: Международной научно-практической конференции «Наука 2017: итоги, достижения, перспективы» (Ставрополь, РФ, 20.12.2017); Международной научно-практической конференции «Козыбаевские чтения - 2017: Казахстан и современные вызовы времени» (г. Петропавловск, Казахстан, 2017); XIII международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, Беларусь, 2018), The 5th International Conference on Green Design and Manufacture 2019 IConGDM 2019 (Bandung, Indonesia, 29-30 April 2019).

Публикации. Основные результаты исследования нашли отражение в 16 научных работах, в том числе, в 4 статьях, опубликованных в изданиях рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, в 2 статьи – в международном научном журнале, имеющем ненулевой импакт-фактор (индексированном в базе данных Scopus, процентиль - 25); в 5 работах, отраженных в трудах международных научных конференций, в том числе 3 зарубежных (одна конференция в базе данных Web of Science), 5 - в республиканских журналах.

Личный вклад автора.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В печатных работах, которые написаны в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль при обобщении и анализе полученных результатов.

Структура диссертации. Диссертация имеет классическую структуру: вводная часть, основная часть (пять глав), заключение, список использованных источников и приложения. Работа изложена на 141 странице компьютерного текста, включает 51 рисунок, 30 таблиц и 165 наименования библиографических источников.

Результаты исследования.

Проанализировав стандартные методы оценки надежности лопаток турбин, установлено, что их суть сводится к теоретическим расчетам действующих центробежных сил, моментов сил инерции и напряженного состояния корневого сечения и пера лопатки в статическом режиме. Данный подход не учитывает динамические моменты, возникающие в реальных условиях эксплуатации турбины ТЭЦ, что снижает их ресурсную долговечность. Для повышения точности прогнозирования отказов турбин разработана интегрированная методика и алгоритм, позволяющие определить вибрационную надежность лопаток с учетом физико-механических свойств их фазовой структуры. Данная база знаний повышает достоверность прочностного расчета и интерпретацию полученных результатов измерений.

Предложенная концепция позволила учесть фактические изменения механических особенностей материала аустенитного класса, применяемого для изготовления рабочих лопаток, прошедших определенный период эксплуатации.

В свою очередь, усталостные процессы в фазовой структуре материала лопатки отражают негативное влияние динамических нагрузок, действующих в реальные условия эксплуатации. Изученные процессы деградации поверхности лопатки позволили расширить номенклатуру восстанавливаемых лопаток, которые ранее отбраковывались.

Обоснование негативного влияния растягивающих и сжимающих напряжений в структуре материала позволило разработать инновационную технологию для восстановления, как геометрических параметров, так и фазово-структурных и физико-механических свойств лопаток турбин ТЭЦ.

Работы, опубликованные по теме диссертации.

1. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Кузнецова В.Н. Исследование механических параметров лопаток турбин ТЭЦ, восстановленных плазменным источником энергии // «Вестник КазНИТУ» Серия технические науки. - Алматы, 2018. - №6 (130) - С. 337-344
2. Savinkin V.V., Ratushnaya T. Ju., Kiselev L.A. Substantiation of efficiency of plasma recovery of physical and mechanical properties of turbine blades of CHP // Вестник СемГУ им. Шакарима. - Семей, 2019. - № 1(85) - С. 92-95
3. Савинкин В.В., Кузнецова В.Н., Ратушная Т.Ю., Киселев Л.А. «Исследование усталостных напряжений в фазовой структуре пера лопатки и оценка ресурсной надежности турбины» // Вестник машиностроения. – Москва, 2019. - №6 – С.34-40
4. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Кузнецова В.Н., Шакирова М.А. Обоснование критериев энергоэффективной эксплуатации турбины ТЭЦ с учетом удельных затрат на восстановление последствий отказа // «Вестник КазНИТУ» Серия технические науки. - Алматы, 2019. - №5 (135) - С. 337-344
5. V. V. Savinkin, V.N. Kuznetsova, T. Yu. Ratushnaya, L.A. Kiselev Method of integrated assessment of fatigue stresses in the structure of the restored blades of CHP and HPS // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. Vol. 330, No 8, P. 65-77 (Web of Science, DOI: 10.18799/24131830/2019/8/2213
6. V. V. Savinkin, T. Yu. Ratushnaya, A. A. Ivanishev, A. R. Surleva, O. V. Ivanova, S. N. Kolisnichenko Study on the Optimal Phase Structure of Recovered Steam Turbine Blades Using Different Technological Spray Modes for Deposition of Al_2O_3 // The 5th International Conference on Green Design and Manufacture 2019 IConGDM 2019 – Bandung, Indonesia 2019. - 2129, 020022 (2019); индексируется Web of Science, DOI:10.1063/1.5118030
7. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Иванова О.В. Статистический анализ причин возникновения структурных дефектов лопаток паровых и газовых турбин // Сборник статей I Международной научно-практической конференции «Наука 2017: итоги, достижения, перспективы»: – Ставрополь: Логос, 20.12.2017. – С. 13-16
8. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Иванищев А.А., Белый А.В., Ковальчук Е.Н. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» по результатам научной стажировки Исследование свойств и структуры

- покрытий, полученных плазменным напылением с применением Al_2O_3 // Современные методы и технологии создания и обработки материалов - Т2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. - Минск, 2018. - С. 229-234
9. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю. Математическое описание основных факторов, повышения газодинамической нагрузки турбины ТЭЦ.// Материалы научного журнала «Вестник СКГУ» № 4(33) 2016. СКГУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, С. 114-118
 10. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Абильмажинова А.А. Исследования концентрации внутренних напряжений в лопатках турбины ТЭЦ методом магнитной памяти металла.// Научно-технический журнал «Метрология». - №1, 2017. – с. 33-42
 11. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Магзумов О.Х., Ярышев Р.Е. Энергоэффективные технологии лазерно-плазменного восстановления и производства лопаток турбин ТЭЦ методом протезирования с применением неразрушающего контроля и интегрированной оценки усталостных процессов в материале изделия.// Материалы МНПК «Козыбаевские чтения - 2017: Казахстан и современные вызовы времени», посвященной 80-летию СКГУ им. М.Козыбаева, 12.10.2017г., г. Петропавловск, С. 53-57
 12. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Иванова О.В., Зыкова Н.В. Определение приоритетных функциональных задач по контрольно-диагностическим системам и технологическим процессам восстановительных комплексов.// Материалы научного журнала «Вестник СКГУ» № 3(36) 2017, СКГУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, С. 56-61
 13. Савинкин В.В., Ратушная Т.Ю., Иванова О.В., Кенжетаяева Л.Д. О способах диагностики скрытых дефектов методом FMEA-анализа. Научно-технический журнал «Новости Госстандарта», №1 (71) 2018, г. Астана, С.22-24.
 14. Ратушная Т.Ю. Повышение эффективности технического диагностирования бронетанковой техники.// Материалы МНПК «Козыбаевские чтения - 2018: Евразийский потенциал и новые возможности развития в условиях глобальных вызовов», посвященной 80-летию СКГУ им. М.Козыбаева, 16.11.2018г., г. Петропавловск, С. 322-325
 15. Ratushnaya T.Yu., Savinkin V.V., Tomashets A. K., Tyukanko V.Yu. Substantiation of criteria for evaluation of substandard turbine blades of CHP in the process of rejection // Научно-технический журнал «Метрология». - №4 (71), 2019. – С. 47-50
 16. Savinkin V.V., Vizureanu P., Sandu A.V., Ratushnaya T.Yu., Ivanischev A.A., Surleva A. Improvement of the Turbine Blade Surface Phase Structure Recovered by Plasma Spraying // Coatings. – 2020. - V 10. - Iss.1. - PP. 62 (Scopus)