

**Исследование и разработка нанокompозитных покрытий для защиты от износа конструкционных материалов перспективных паровых турбинах с использованием экспериментального комплекса уникальных стендов и установок – «Гидроударный стенд Эрозия-М» (УСУ «Гидроударный стенд Эрозия-М»)**

Работа проведена в 2011-2012 гг. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 г.г.»

государственный контракт № 16.518.11.7031.

Научный руководитель проекта: к.т.н. Погорелов С.И.

Ответственный исполнитель: к.т.н. Медников А.Ф.

**Цель исследования, разработки**

*Основной задачей* научных исследований является исследование и разработка защитных износостойких нанокompозитных покрытий для конструкционных материалов современных паровых турбин с использованием экспериментального комплекса уникальных стендов и установок - «Гидроударный стенд Эрозия-М» (УСУ «Гидроударный стенд Эрозия-М») и разработка технических решений, обеспечивающих:

- увеличение длительности инкубационного периода в кинетике процесса эрозионного разрушения конструкционных материалов при высокоскоростном взаимодействии с жидкими средами не менее чем в 7 раз;

- увеличение коррозионной стойкости конструкционных материалов в рабочих средах с высоким содержанием хлоридов не менее чем в 5 раз;

- снижение коэффициента трения функциональных поверхностей элементов паровых турбин (лопатки, золотники систем регулирования) не менее чем в 2 раза.

*Цель исследования:*

Получение новых знаний и результатов в области процессов поверхностного разрушения конструкционных материалов под воздействием каплеударной эрозии и коррозии, создания защитных нанокompозитных покрытий с использованием ионно-плазменных технологий.

Обеспечение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, проводимых организациями Российской Федерации, с предоставлением им возможности использования методов научных исследований, разработанных или освоенных для уникальной установки, стенда (УСУ).

Разработка технических решений создания перспективных защитных нанокompозитных покрытий, обеспечивающих повышение коррозионной и эрозионной стойкости конструкционных материалов сверхдлинных рабочих лопаток паровых турбин.

Развитие материально-технической базы УСУ путем дооснащения имеющихся специализированных комплексов (лабораторий) приобретаемым научным оборудованием для обеспечения и развития исследований в форме коллективного пользования.

**Основные результаты проекта**

Осуществлен анализ способов упрочнения входных и выходных кромок рабочих лопаток сверхмощных современных паровых турбин от каплеударной эрозии. Рассмотрено состояние проблемы эрозионного износа элементов энергетического оборудования и, в первую очередь, рабочих лопаток последних ступеней сверхмощных (свыше 600 МВт) паровых турбин. Проведен анализ способов защиты материала лопаток от эрозионного износа.

Разработана концепция повышения эрозионной стойкости рабочих лопаток сверхмощных (свыше 600 МВт) паровых турбин, заключающаяся в обработке рабочих поверхностей лопаток путем ионно-плазменного азотирования и последующей

модификации с использованием 2D и 3D нанокompозитных вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе переходных металлов и их соединений в едином цикле.

Разработана методика проведения коррозионных испытаний опытных образцов электрохимическим методом с использованием современного потенциостата IPC-Pro, позволяющая оценивать скорость коррозии материалов и покрытий и проводить сравнения коррозионной стойкости образцов с различными видами обработки, упрочнения, покрытий.

Разработана методика формирования модифицированного слоя и нанокompозитного покрытия в едином цикле на основе способов ионно-плазменной обработки лопаточных материалов в азотной плазме и ионного распыления в вакууме.

Осуществлено дооснащение УСУ необходимым научным оборудованием. Приобретена приставка для анализа материалов в дальнем ИК-диапазоне для исследования свойств материалов и покрытий с помощью ИК-Фурье спектроскопии, позволяющая расширить аналитические возможности ИК Фурье спектрометра Vertex 70, проводить анализ структуры и состава образцов, содержащих колебания тяжелых атомов, повысить качество получаемой информации, как в среднем, так и дальнем диапазоне инфракрасного спектра

Разработана программа развития материально-технической базы УСУ «Гидроударный стенд Эрозия-М», позволяющая обеспечить проведение исследований в форме коллективного пользования в рамках реализации мероприятий ФЦП и других научных проектов.

Проведены патентные исследования. Проверка на патентную чистоту исследуемого объекта позволила сделать вывод, что он обладает патентной чистотой и новизной, так как не обнаружено ни одного действующего охранного документа, порочащего патентную чистоту разработки.

Сформированы нанокompозитные покрытия на контрольных и опытных образцах, изготовленных из стали 20X13 и стали с 17%-м содержанием хрома. Для обеспечения равномерности толщины покрытий на длинномерных изделиях проведены экспериментальные исследования распределения толщины покрытия, формируемого магнетронным способом, по высоте вакуумной камеры. Проведены исследования температурных режимов ионно-плазменного азотирования и формирования ионно-плазменных нанокompозитных покрытий и на их основе оптимизированы этапы технологического цикла формирования таких покрытий. Сформированы нанокompозитные покрытия следующих типов:

- на основе нитрида титана и нержавеющей стали;
- на основе титана и нержавеющей стали;
- на основе нитрида титана и алюминия.

Испытаны полученные защитные покрытия на установке для испытаний на каплеударную эрозию - УСУ "Гидроударный стенд Эрозия-М".

Проведены металлографические исследования образцов, обработанных в азотной плазме и образцов с нанокompозитными покрытиями.

Изучено влияния упрочнения поверхности лопаточной стали на предел выносливости материала. Предел выносливости образцов из стали 20X13 в исходном состоянии, испытываемых на воздухе составляет 340 МПа, а предел выносливости образцов на воздухе в упрочненном состоянии (азотирование) не менее чем на 20% выше. Предел выносливости образцов из высокохромистой лопаточной стали в исходном состоянии, испытываемых на воздухе составляет 460 МПа, а предел выносливости образцов на воздухе в упрочненном состоянии (азотирование) не менее чем на 15% выше.

Модернизирован вакуумный модуль установки УСУ «Гидроударный стенд Эрозия-М»: изготовлена новая вакуумная камера и узел ввода вращения, позволяющие проводить испытания образцов на скоростях соударения с каплями жидкости до 660 м/с.

Изучено влияния режимов обработки лопаточных сталей в азотной плазме на

эрозионную стойкость. Определен режим ионно-плазменного азотирования, при котором длительность инкубационного периода стали 20X13 увеличивается не менее чем в 3 раза.

Изучено влияния режимов формирования ионно-плазменных покрытий на эрозионную стойкость предварительно упрочненной лопаточной стали. Определен режим формирования покрытия, обеспечивающего увеличение эрозионной стойкости более чем в 6 раз

Проведены эрозионные исследования образцов, обработанных в азотной плазме, и образцов с нанокompозитными покрытиями. Комбинация ионно-плазменного азотирования и нанокompозитного покрытия на основе нитридов титана и алюминия обеспечивает увеличение стойкости к каплеударной эрозии не менее чем в 8 раз.

Проведены трибологические исследования образцов из лопаточных сталей, обработанных в азотной плазме, и образцов с нанокompозитными покрытиями. Снижение коэффициента трения лопаточных сталей не менее чем в 2 раза достигается при комплексной обработке, включающей в себя ионно-плазменное азотирование и формирование на поверхности нанокompозитных покрытий на основе нитридов и карбонитридов титана.

Проведено дооснащение УСУ необходимым научным оборудованием (приобретение НПВО-приставки многократного отражения для исследования свойств материалов покрытий с помощью ИК-Фурье спектрометрии).

**Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках исследования, разработки**

Заявка на изобретение № 2012149039 от 19.11.2012 «Способ нанесения нанокompозитного покрытия на поверхность стального изделия», РФ.

**Назначение и область применения результатов проекта**

Область использования результатов – теплоэнергетика, топливно-энергетический комплекс.

Полученные результаты исследований будут использованы:

- для получения новых знаний о механизме поверхностного разрушения защитных покрытий и конструкционных материалов от каплеударной эрозии;
- для получения итоговых характеристик, параметров и условий быстропротекающего процесса высокоскоростного удара капли о поверхность;
- для расширения возможностей фундаментальных исследований в области физики прочности;
- для понимания физики механизма эрозионного изнашивания, учитывающего высокоскоростной характер импульсного деформирования;
- для разработки новых способов формирования нанокompозитных ионно-плазменных покрытий, предназначенных для предотвращения преждевременного разрушения поверхностей функциональных элементов различного оборудования, эксплуатирующихся при воздействии комплекса повреждающих факторов

Практические результаты выполненных исследований найдут широкое применение в тепловой и атомной энергетике, нефтяной и газовой промышленности, машиностроении, химической промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве и др.

Внедрение технологий, разработанных по результатам исследований, позволят получить следующие социально-экономические эффекты:

- снижение риска аварий и техногенных катастроф;
- повышение конкурентоспособности отечественной продукции;
- значительное сокращение объемов недовыработки тепловой и электрической энергии
- уменьшение затрат на ремонт и замену преждевременно вышедшего из строя оборудования.

Во внедрении разработанных технологий и оборудования заинтересованы генерирующие энергетические компании, производители паротурбинного оборудования,

такие как ОАО «Силловые машины», ЗАО «ЦРМЗ», крупные теплоснабжающие организации такие, как ОАО «Московская объединенная энергетическая компания» (ОАО «МОЭК») и т.п.

#### **Эффекты от внедрения результатов проекта**

Снижение материало- и энергоёмкости производства.

Уменьшение отрицательного техногенного воздействия на окружающую среду.

Повышение качества жизни и здоровья населения.

Повышение конкурентоспособности услуг.

Улучшение экологической обстановки за счет снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

Создание принципиально новой продукции.

Улучшение потребительских свойств продукции.

Усиление конкурентных позиций отечественных науки и бизнеса.

Повышение производительности труда.

Улучшение условий труда.

#### **Формы и объемы коммерциализации результатов проекта**

Оказание услуг по определению характеристик, параметров и условий быстропротекающего процесса высокоскоростного удара капли о поверхность.

Оказание услуг по определению механизма поверхностного разрушения защитных покрытий и конструкционных материалов от каплеударной эрозии.

Оказание услуг по определению перспективных способов защиты теплоэнергетического оборудования от каплеударной эрозии.

Объектом реализации потребителям по итогам выполнения проекта будут являться технические решения упрочнения лопаточных материалов на основе применения ионно-плазменных технологий создания упрочненного слоя и формирования перспективных защитных нанокompозитных покрытий, а также отчет по НИР, содержащий оценки, сравнения и рекомендации по защите теплоэнергетического оборудования от каплеударной эрозии.

УСУ «Гидроударный стенд Эрозия-М» входит в перечень уникальных стендов и установок РФ, поэтому в настоящее время в Российской Федерации полный цикл проверки материалов и способов их защиты от каплеударной эрозии в соответствии с требованиями руководящей документации возможен только на этом стенде (монополия на услугу).