

## **Разработка прорывных технологических решений, направленных на повышение эрозионных характеристик элементов турбоустановок, эксплуатирующихся в экстремальных условиях**

Работа проведена в 2016 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.» в период с 01 января 2016 г. по 31 декабря 2016 г.

Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0180 от 27 октября 2015г. (Этап 2)

Научный руководитель проекта: старший научный сотрудник НЦ «Износостойкость», к.т.н. Медников Александр Феликсович.

Ответственный исполнитель: инженер НЦ «Износостойкость», Тхабисимов Александр Борисович

### **1. Цель прикладного научного исследования и экспериментальной разработки**

Обеспечение надежности эксплуатации и продления ресурса работы высоконагруженных элементов турбоустановок, за счёт разработки технологических решений по формированию защитных покрытий и модификации функциональных поверхностей, направленных на многократное повышение эрозионной и коррозионной стойкости при сверхскоростном (до 800 м/с) ударном воздействии жидких частиц.

### **2. Основные результаты ПНИЭР**

В 2016 году в рамках 2 этапа в период с 01 января 2016 г. по 31 декабря 2016 г. в соответствии с Планом-графиком исполнения обязательств выполнялись следующие работы:

- Сформированы покрытия на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13, в т.ч. с использованием магнетронного распыления при высоких температурах катода-мишени магнетронного распылительного устройства.

- Проведена модификация поверхности экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 с использованием высокоомощного импульсного магнетронного разряда и последующее формирование на них покрытий, в т.ч. с использованием магнетронного распыления при высоких температурах мишени.

- Проведены эрозионные, коррозионные и усталостные экспериментальные исследования экспериментальных образцов из лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13: - без покрытий; - с покрытиями; - с модифицированной поверхностью; - с модифицированной поверхностью и с покрытиями.

На основании анализа полученных результатов осуществлен выбор лучших способов защиты.

- Разработана методика теоретического исследования влияния сверхскоростного каплеударного воздействия на характеристики поверхности и приповерхностного слоя экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 (без покрытия, с лучшим типом: покрытия, способа модификации поверхности, способа модификации поверхности с покрытием).

- Разработаны программа и методика проведения на экспериментальном образце сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+» эрозионных экспериментальных исследований экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 (без покрытия, с лучшим типом: покрытия, способа модификации поверхности, способа модификации поверхности с покрытием).

- Приобретены комплектующие, узлы и агрегаты для создания экспериментального образца сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+».

- Разработана эскизная конструкторская документация на изготовление макета сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда.

- Проведены работы по определению состава, микротвердости, толщины, шероховатости, коэффициента трения и стойкости к царапанию покрытий, сформированных на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 с задействованием используемого научно-исследовательского оборудования.

– Проведены работы по модификации поверхности экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 с использованием высокоомощного импульсного магнетронного разряда и задействованием используемого технологического оборудования.

– Проведены работы по определению состава, микротвердости, глубины, шероховатости, коэффициента трения модифицированной поверхности экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 с задействованием используемого научно-исследовательского оборудования.

– Проведены работы по определению глубины и состава модифицированного слоя, а также толщины, состава, шероховатости, коэффициента трения, стойкости к царапанию покрытий, сформированных на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13, с задействованием используемого научно-исследовательского оборудования.

– Приобретены расходные материалы для проведения металлографических исследований экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13.

– Приобретены комплектующие, узлы и агрегаты, изготовлен макет сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда.

– Приобретены комплектующие для экспериментального образца сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+».

– Обеспечено участие Получателя субсидии в мероприятиях по демонстрации и популяризации промежуточных результатов ПНИЭР.

При этом были получены следующие результаты:

На экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 сформированы 2 типа покрытия (толщиной 10-20 мкм, микротвердостью от 1200 до 1900 HV 0,05): на основе TiAlN с применением планетарного вращения оснастки относительно системы магнетронов и на основе Cr-CrN с использованием магнетронного распыления при высоких температурах катода-мишени магнетронного распылительного устройства. Модификация поверхности (с глубиной модифицированного слоя от 20 до 60 мкм и микротвердостью от 1000 до 1300 HV 0,2) экспериментальных образцов проводилась путем поверхностного насыщения поверхности образцов в среде азота (азотирование) длительностью 1 час, 2,5 часа и 5 часов.

Впервые проведены комплексные металлографические и экспериментальные исследования образцов из сталей 12Х13 и ЭИ961, наиболее часто применяющихся для изготовления лопаток паровых турбин, с различными способами пассивной защиты их поверхности. На основе проведенного анализа полученных результатов исследований выбраны лучшие по совокупным свойствам и характеристикам покрытия и режимы модификации поверхности. Разработана методика теоретического исследования влияния сверхскоростного каплеударного воздействия на характеристики поверхности и приповерхностного слоя экспериментальных образцов лопаточных сталей с выбранными лучшими способами пассивной защиты, предназначенная для проведения металлографических исследований процессов зарождения разрушения, происходящих в металле после сверхскоростного (до 800 м/с) каплеударного воздействия.

Результаты проведенных эрозионных, коррозионных и усталостных исследований образцов с покрытиями, с модифицированной поверхностью и с модифицированной поверхностью и покрытиями позволяют констатировать существенный эффект от применения ионно-плазменных технологий за счет улучшения характеристик и свойств поверхности исследуемых лопаточных сталей, а именно: повышение эрозионной стойкости не менее чем в 3-7 раза (до начала разрушения и на участке с установившейся скоростью эрозии) при высокоскоростном 300 м/с ударном воздействии жидких частиц диаметром 800 мкм; повышение стойкости к питтинговой коррозии не менее чем в 3-8 раз; повышение предела выносливости на 30-50% на базе  $10^7$  циклов нагружения.

Индустриальным партнером (ООО «НПО «Технопрогресс») приобретены комплектующие для сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда и изготовлен его макет, состоящий из испытательного и режимного модулей, позволяющий проводить отработку и наладку режимных параметров сверхскоростных эрозионных испытаний с фиксацией работы основных узлов, определением их состояния и возможностью моделирования различных схем их подключения и эксплуатации.

Разработаны программа и методика проведения эрозионных экспериментальных исследований экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 без покрытия, с лучшим типом: покрытия, способа модификации поверхности, способа модификации поверхности с покрытием с использованием, создаваемого в рамках проекта, уникального исследовательского эрозионного стенда, что позволит вкпе с разработанной методикой теоретического исследования влияния сверхскоростного (до 800 м/с) каплеударного воздействия получить не имеющие аналогов в мире научные результаты.

По результатам проведенной работы подана заявка на изобретение № 2016143145 от 02.11.2016г. «Узел катода магнетронного распылителя», РФ.

Результаты проекта, полученные на отчетном этапе, полностью соответствуют требованиям Технического задания и Плана-графика исполнения обязательств.

### 3. Область применения результатов проекта

Полученные научно-технические результаты ПНИЭР будут направлены на разработку технологических решений, предназначенных для защиты высоконагруженных элементов турбоустановок, работающих на суперсверхкритических и ультрасверхкритических параметрах пара, от сверхскоростного каплеударного воздействия.

Разработанные технологические решения будут обеспечивать повышение эрозионной стойкости исследуемых материалов не менее чем в 2 раза при сверхскоростном ударном воздействии жидких частиц, а также повышение коррозионной стойкости не менее чем в 3 раза при неизменности исходных значений усталостных характеристик материала подложки.

Разработанные технологические решения позволят модернизировать промышленное производство элементов парового тракта турбоустановок (лопаточные аппараты последних ступеней цилиндров низкого давления паровых турбин). При этом прогнозируется обеспечение следующих показателей народно-хозяйственного эффекта:

- повышение срока службы лопаточного аппарата последних ступеней цилиндров низкого давления паровых турбин за счет многократного увеличения их стойкости к коррозионному и эрозионному износу, что обеспечит снижение числа и трудоемкости ремонтов, снижение числа отказов оборудования и серьезных аварий;
- повышение КПД ступени за счет снижения профильных потерь, вызванных износом поверхностей рабочих лопаток;
- снижение вредного воздействия на окружающую среду за счет применения экологически чистых процессов формирования ионно-плазменных покрытий в вакууме.

В качестве потенциальных потребителей результатов проекта могут выступать как крупные предприятия-изготовители турбинного оборудования, так и электростанции, заинтересованные в значительном снижении затрат на обслуживание и ремонт энергетического оборудования.

Научно-технические результаты проекта будут использоваться Индустриальным партнером - организацией реального сектора экономики, как в своей повседневной деятельности, так и в разработке и создании новых способов защиты элементов энергетического оборудования. Также, одними из крупнейших заинтересованных сторон в реализации проекта могут выступить следующие предприятия: ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС», ООО «Газпром энергохолдинг», ОАО «Силовые машины», ОАО «Турбоатом», ЗАО «УТЗ» и др. На 2 этапе коммерциализация проекта не предусмотрена. При дальнейшей коммерциализации полученных результатов применение разработанных технологических решений позволит Индустриальному партнеру организовать производство по формированию покрытий на элементах оборудования турбоустановок.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.