

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

Работа проведена в 2017 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.» в период с 01 января 2017 г. по 31 декабря 2017 г.

Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0180 от 27 октября 2015г. (Этап 3)

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

Ответственный исполнитель: младший научный сотрудник НЦ «Износостойкость»,
к.т.н. 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 2017 году в рамках 3 этапа в период с 01 января 2017 г. по 31 декабря 2017 г. в соответствии с Планом-графиком исполнения обязательств выполнялись следующие работы:

- приобретены комплектующие, узлы и агрегаты для создания экспериментального образца сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия–2М+»;
- сформированы на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 выбранного лучшего типа покрытия, способа модификации поверхности с покрытием;
- проведены эрозионные экспериментальные исследования на экспериментальном образце сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия–2М+» экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 (без покрытия, с лучшим типом: покрытия, способа модификации поверхности, способа модификации поверхности с покрытием);
- проведены металлографические теоретические 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 технологические решения, обеспечивающие повышение эрозионной стойкости лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 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;
- разработан проект технического задания на проведение ОКР по теме «Разработка и изготовление опытного образца установки по формированию защитных эрозионностойких покрытий на элементах турбоустановок»;
- проведены работы по формированию на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 выбранного лучшего способа модификации поверхности с задействованием используемого технологического оборудования;
- проведены работы по определению глубины и состава модифицированного слоя, а также толщины, состава, шероховатости, коэффициента трения и стойкости к царапанию лучшего типа покрытия, способа модификации поверхности, способа модификации

поверхности с покрытием, сформированных на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13, с задействованием используемого научно-исследовательского оборудования;

- приобретены комплектующие, узлы и агрегаты, изготовлен экспериментальный образец сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия–2М+»;

- обеспечено участие Получателя субсидии в мероприятиях по демонстрации и популяризации промежуточных результатов ПНИЭР;

- проведены маркетинговые исследования рынка эрозионностойких покрытий для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин;

- проведена технико–экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов;

- разработаны технические требования и предложения по созданию установки для формирования защитных эрозионностойких покрытий на лопатках турбин, эксплуатирующихся в экстремально тяжелых условиях.

При этом были получены следующие результаты:

На экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 сформированы выбранные на 2 этапе лучшие типы покрытия, способа модификации поверхности и способа модификации поверхности с покрытием. Для стали 12Х13 лучший тип покрытия – покрытие TiAlN, лучший способ модификации поверхности - модификация поверхности (азотирование 2,5 часа) ,лучший способ модификации поверхности с покрытием - модификация поверхности (азотирование 2,5 часа) + покрытие TiAlN. Для стали ЭИ961 лучший тип покрытия - покрытие TiAlN, лучший способ модификации поверхности - модификация поверхности (азотирование 2,5 часа), лучший способ модификации поверхности с покрытием - модификация поверхности (азотирование 5 часов) + покрытие Cr-CrN.

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

В результате исследований, проведенных для лучшего типа покрытия, способа модификации поверхности, способа модификации поверхности с покрытием, сформированных на экспериментальных образцах лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13, было установлено, что:

- глубина модифицированных слоев после 2,5 часов азотирования составляет в среднем $37 \div 40$ мкм, после 5 часов азотирования стали ЭИ961 - 76 мкм; размер зерна в модифицированных слоях практически не меняется, имеются включения (в виде нитрида хрома), расположенные преимущественно по границам зерен;

- содержание азота в модифицированных слоях в среднем находится на уровне 3,3-5,3%, в пределах слоя концентрация азота изменяется слабо; в слое также наблюдается незначительное повышение содержания хрома при одновременном снижении содержания железа;

- толщина покрытий на стали 12Х13 в среднем составляет $11,3 \div 13,6$ мкм, на стали ЭИ961 – $20,1 \div 21,4$ мкм;

- покрытия №2 (TiAlN) имеют слоистую структуру с толщиной адгезионного подслоя и промежуточных слоев с пониженным содержанием азота $0,3 \div 0,6$ мкм, нитридных слоев - $1,5 \div 1,9$ мкм, чередующихся подслоев TiN и AlN от 20 до 130 нм;

- в покрытии №1 (Cr-CrN), сформированном на стали ЭИ961 после модификации (азотирование 5 часов), слои хрома толщиной $1,0 \div 1,7$ мкм чередуются со слоями CrN толщиной $3 \div 4$ мкм; в пределах слоев покрытие имеет волокнистую структуру, ширина волокон в нитридных слоях $20 \div 100$ нм;

- содержание азота в покрытии №1 в среднем составляет около 3 %, хрома - около 97 %; в покрытии №2 содержание алюминия в среднем составляет 30,5÷34,5%, титана 59÷61 %, азота 5,1÷7,0 %;

- покрытия имеют зернистую структуру поверхности, с характерным размера зерна 200÷300 нм - у покрытия №1 (Cr-CrN) и 150÷250 нм - у покрытия №2 (TiAlN);

- шероховатость поверхности при нанесении покрытия увеличивается незначительно (в пределах класса); при модификации и сочетании модификации с нанесением покрытия повышение шероховатости происходит не более чем на 1 класс по сравнению с исходной;

- микротвердость модифицированных слоев по сравнению с микротвердостью основного материала выше в 3,5÷4,5 раза и в среднем составляет 970÷1230 HV0,01, модуль упругости - 260÷280 ГПа;

- микротвердость покрытия №1 (Cr CrN) в среднем составляет 1620 HV0,01, покрытия №2 (TiAlN) – 1080÷1130 HV0,01; модуль упругости у покрытия №1 – в 1,4 раза выше, чем у основного материала, у покрытия №2 в 1,2÷1,6 раза ниже;

- покрытие №2 более пластичное, нежели покрытие №1, у которого доля работы упругой деформации при индентировании η_{IT} выше 1,4÷1,5 раза выше и составляет 57%;

- стойкость к царапанию образцов с покрытием с предварительной модификацией поверхности выше, чем без модификации, критические нагрузки разрушения, соответствующие появлению трещин и отслоению покрытий, увеличиваются более чем в 1,5 раза;

- износ при трении образцов ЭИ961 и 12Х13 с модифицированным поверхностным слоем, по сравнению с величиной износа исходных материалов, ниже в 5 раз и более; средний коэффициент трения также уменьшился (в 1,1÷1,5 раза по сравнению с исходным);

- коэффициент трения образцов с покрытиями выше, чем у образцов после модификации, и составляет от 0,6 до 0,74; износ образцов с покрытиями также высокий, особенно у покрытия №2 (TiAlN);

- полученные на данном этапе значения основных исследуемых характеристик, в целом, сопоставимы со значениями, полученными для аналогичных типов образцов на 2 этапе.

Приобретены комплектующие, узлы и агрегаты и изготовлен экспериментальный образец сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия–2М+», предназначенный для проведения эрозионных экспериментальных исследований экспериментальных образцов лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 без покрытия, с лучшими типами покрытия, способа модификации поверхности и их совокупности и обеспечивающий проведение эрозионных испытаний в вакууме при скорости соударения образца с моно- или полидисперсным потоком жидкости до 800 м/с, а также позволяющий получать изображения динамики разрушения и трансформации, как испытываемой поверхности, так и ударяющихся капель жидкости или их облака с использованием системы высокоскоростной фото- и видеосъемки.

Технические характеристики созданного экспериментального образца сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+»:

- скорость соударения капель жидкости с экспериментальными образцами – до 800 м/с;

- число оборотов штанги со сверхскоростным профилем - свыше 12 000 об/мин;

- давление в камере эрозионного стенда – не более 10±0,1 кПа;

- генерация моно- и полидисперсных потоков капель от 50 до 1500 мкм, облака капель с характерными размерами капель от 10 до 500 мкм.

Экспериментальный образец сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+» состоит из нескольких систем:

- системы высокооборотного вращения, включающую штангу с сверхскоростным профилем, высокоскоростной привод вращения (с системой охлаждения и управления), принудительно смазываемый (с системой фильтрации) и охлаждаемый высокооборотный узел вращения;

- системы вакуумной откачки воздуха из камеры;
- систем подачи рабочей жидкости, водоподготовки, охлаждения;
- системы генерации капель, состоящую из генератора моно- и полидисперсных потоков капель, облака капель;
- системы высокоскоростной фото- и видеосъемки, позволяющей получать изображения динамики разрушения и трансформации испытываемой поверхности и ударяющихся капель жидкости или их облака;
- системы подавления вибрации;
- системы автоматизированного управления и обработки данных, включая контрольно-измерительное оборудование (датчики вибрации, температуры, давления и т.п.), в том числе обеспечивающую для оператора стенда удаленный доступ.

Для экспериментальных образцов из лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13: без покрытий; с лучшим типом: покрытия; с модифицированной поверхностью; с модифицированной поверхностью и с покрытиями на экспериментальном образце сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+» были проведены эрозионные экспериментальные исследования при скорости соударения $C_{уд} = 740$ м/с и диаметре капель жидкости $d_k = 500$ мкм. Анализ полученных результатов эрозионных экспериментальных исследований и выбор наилучших способов защиты по эрозионной стойкости показал, что:

- для стали 12Х13 модификация поверхности (азотирование 2,5 часа) + покрытие TiAlN приводит к увеличению длительности инкубационного периода в 2,1 раза, снижению скорости износа на участке с максимальной скоростью эрозии в 1,8 раза, снижению скорости износа на участке с установившейся скоростью эрозии в 1,6 раза;
- для стали ЭИ961 модификация поверхности (азотирование 5 часов) + покрытие Cr-CrN приводит к увеличению длительности инкубационного периода в 2,2 раза, снижению скорости износа на участке с максимальной скоростью эрозии в 2,2 раза, снижению скорости износа на участке с установившейся скоростью эрозии в 2 раза.
- указанные выше способы защиты увеличивают эрозионную стойкость сталей 12Х13 и ЭИ961 при сверхскоростном ударном воздействии жидких частиц ($C_{уд} = 660$ м/с и 740 м/с) в 2,1 ÷ 2,2 раза.

Для проведения металлографических теоретических исследований 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) на экспериментальном образце сверхскоростного исследовательского эрозионного стенда «Эрозия-2М+» были проведены дополнительные эрозионные исследования при скорости соударения $C_{уд} = 660$ м/с и диаметре капель жидкости $d_k = 500$ мкм с шагом по времени экспонирования образцов на стенде 30, 60, 90, 120, 150 секунд. В соответствии с «Методикой 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)», разработанной на 2-м этапе, проведены исследования эродированной поверхности образцов с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU и механического профилометра Dektak 150, приповерхностного слоя на поперечных металлографических шлифах с использованием электронного микроскопа и твердомера для малых нагрузок DuraScan 20, получены фрактограммы, профилограммы и 3D-карты поверхности, изображения приповерхностного слоя, определена шероховатость поверхности, микротвердость и толщина поврежденного слоя в различных областях эрозионного «следа», построены графики распределения высоты наибольшего выступа профиля R_p , глубины наибольшей впадины профиля R_v , среднего шага неровностей профиля S_m , а также изменения

микротвердости в приповерхностной области по ширине «следа», графики изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя и зависимости средних значений всех перечисленных величин от времени каплеударного воздействия. На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- У образцов стали 12Х13 каплеударное воздействие вызывает большее повреждение поверхности (больше размеры и количество эрозионных каверн, большие значения толщины поврежденного слоя), по сравнению со сталью ЭИ961, что может быть обусловлено наличием большего количества неметаллических включений, чуть меньшей твердостью и большей длиной зерен в стали 12Х13. Азотирование в обоих случаях приводит к уменьшению поврежденности поверхности.

- Параметры шероховатости R_p и R_v в среднем увеличиваются с увеличением длительности каплеударного воздействия. Характер их изменения связан с одной стороны увеличением количества повреждений поверхности, с другой – с ростом отдельных каверн, слияние которых на последнем этапе приводит к снижению скорости роста или уменьшению средних значений R_p и R_v . Минимальный перепад высот наблюдается у образцов с модификацией поверхности, а также модификацией и покрытием. Однако у образцов с покрытием такой эффект достигается за счет того, что отслоение покрытий происходит большими участками, а модификация еще некоторое время удерживает поверхность от катастрофического разрушения.

- У материалов лопаточных сталей каплеударное воздействие приводит к появлению наклепанной зоны, боковых и медианных трещин, «туннелей» (образовавшихся при развитии боковых трещин). Вертикальные стенки каверн на поверхности образцов имеют вязкий волокнистый излом.

- У азотированных слоев после каплеударного воздействия зоны наклепа практически не наблюдается, она образуется в основном материале непосредственно под модифицированным слоем при уменьшении в процессе эрозии толщины упрочненного слоя. Для азотированного слоя характерно хрупкое разрушение. Преобладание боковых трещин обеспечивает сколы относительно тонких поверхностных слоев. Развитие трещин и микровыворы и в основном материале, и в азотированном слое происходят по границам зерен.

- В случае покрытий, в том числе и на азотированном слое, наблюдается «смятие» материала под покрытием под воздействием удара капли, разлом покрытия на краях образовавшейся в материале «вмятины» и последующее отслоение его по границе с подложкой или границам отдельных слоев, которое может происходить в области, размер которой значительно больше изначального очага разрушения.

- Микротвердость приповерхностного слоя лопаточных сталей без модификации и нанесения покрытий при длительности воздействия от 30 до 150 сек возрастает, что связано с увеличением толщины наклепанного слоя. Микротвердость модифицированного слоя и покрытия после каплеударного воздействия несколько снижается (из-за накопления поврежденности). Средняя в области эрозионного износа микротвердость приповерхностного слоя с модификацией поверхности, покрытием, а также с модификацией и покрытием уменьшается из-за увеличения области эродированного основного материала. Покрытие уже после 60 сек экспозиции в значительной мере теряет свои защитные свойства. Модификация и модификация с покрытием лучше всего защищают основной материал от воздействия удара капель жидкости, при этом основная защитная функция принадлежит азотированному слою.

- Применение модификации поверхности, нанесения покрытия, а также модификации с последующим нанесением покрытия, приводит к тому, глубина поврежденного слоя (после 150 сек воздействия) меньше, чем у исходной стали 12Х13 в $1,6 \div 2,4$ раза и в $2,4 \div 9$ раз – по сравнению со сталью ЭИ961.

Разработанный лабораторный технологический регламент на процесс формирования эрозионностойких покрытий предназначен для проведения опытно-

технологических работ, направленных на создание технологий повышения эрозионной стойкости элементов турбоустановок и обеспечивает повышение эрозионной (при сверхскоростном каплеударном воздействии) и коррозионной стойкости лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 при неизменности их усталостных характеристик, изменение (повышение) шероховатости поверхности после её модификации и/или формирования покрытия не более чем на 1 класс от исходной, полную экологическую безопасность процесса модификации поверхности и формирования покрытий.

В рамках выполнения работ по 3 этапу получены охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД):

- Изобретение патент №2627820 от 11.08.2017г. «Узел катода магнетронного распылителя», РФ;

- Полезная модель, заявка №2017136556 от 17.10.2017г. «Устройство подвода энергоносителей к технологическому распылителю», РФ.

- Изобретение, заявка № 2017141319 от 28.11.2017г. на изобретение «Способ нанесения покрытия на поверхность стального изделия», 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 были использованы при разработке технологических решений, предназначенных для защиты высоконагруженных элементов турбоустановок, работающих на суперсверхкритических и ультрасверхкритических параметрах пара, от сверхскоростного каплеударного воздействия. Разработанные технологические решения обеспечивают повышение эрозионной стойкости лопаточных сталей ЭИ961 и 12Х13 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.

Полученные 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 3 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.

В целях коммерциализации (практического использования) результатов интеллектуальной (научно-технической) деятельности, полученных в рамках проекта ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" совместно с ООО ""НПО "Технопрогресс" осуществлены следующие мероприятия:

- разработан проект Технического задания ОКР на разработку и изготовление опытного образца установки по формированию защитных эрозионностойких покрытий на элементах турбоустановок;
- проведены маркетинговые исследования рынка эрозионностойких покрытий для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин;
- проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов;
- разработаны технические требования и предложения по созданию установки для формирования защитных покрытий на лопатках турбин, эксплуатирующихся в экстремально тяжелых условиях;
- проведена популяризация промежуточных и заключительных результатов ПНИЭР.

В настоящее время ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" совместно с Индустриальным партнером ООО ""НПО "Технопрогресс" заключен Лицензионный договор № 7–17 от 29.08.2017г. о передаче права использования патента на изобретение РФ № 2627820 от 11.08.2017г. "Узел катода магнетронного распылителя".

4. Оценка перспектив продолжения работ по проекту

Результаты работ, полученные на третьем заключительном этапе выполнения Соглашения, полностью соответствуют техническим требованиям к выполняемому проекту и дают основание полагать, что выполнены все поставленные задачи, и результаты ПНИЭР найдут широкое применение в промышленности.

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