

Создание новых высокотехнологичных способов защиты элементов турбоустановок, эксплуатирующихся при совокупном воздействии газоабразивного потока и высоких температур

Работа проведена в 2014 - 2015 г.г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 г.г.»

Соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0011 от 17 июня.2014г. (Этап 3)

Научный руководитель проекта: ст.научн.сотр. НЦ «Износостойкость», к.т.н. А.Ф. Медников

Ответственный исполнитель: инженер НЦ «Износостойкость» А.Б. Тхабисимов

1. Цель прикладного научного исследования и экспериментальной разработки

Разработка технологических основ защиты элементов турбоустановок от абразивного износа посредством реализации комплекса мероприятий, сочетающих модификацию поверхности и формирование защитных покрытий и обеспечивающих многократное повышение абразивной стойкости конструкционных материалов при эксплуатации в условиях высоких температур.

2. Основные результаты ПНИ

В результате выполнения ПНИ с использованием современного лабораторного оборудования получены новые составы износостойких покрытий, обладающие уникальными свойствами и соответствующие лучшим мировым образцам подобных разработок. С использованием современного лабораторного оборудования и разработанной методики исследований абразивной стойкости при повышенных температурах (до 550С) проведен уникальный комплекс исследований образцов из лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ без покрытий и со сформированными защитными покрытиями. По результатам проведенных исследований определены условия и получен экспериментальный образец защитного покрытия на основе Cr-CrC на лопатке части высокого давления паровой турбины типа ПР-6, увеличивающий в 6 раз стойкость лопаточного материала к абразивному износу в течение инкубационного периода. С помощью минимально возможного набора технологических параметров и установления допустимых диапазонов их вариации определены новые высокотехнологичные способы защиты новых и отремонтированных элементов турбин и компрессоров, эксплуатирующихся при совокупном воздействии газоабразивного потока и высоких температур, базирующиеся на формировании ионно-плазменных покрытий с высокой абразивной стойкостью.

В ходе выполнения ПНИ:

- проведен аналитический обзор современной научно-технической проблемы абразивного износа элементов турбомашин, эксплуатирующихся при совокупном воздействии газоабразивного потока и высоких температур, который позволил выявить факторы, влияющие на интенсивность абразивного износа лопаточного аппарата, а именно: размер и твердость абразивных частиц, их скорость и угол соударения с рабочими поверхностями, а также температура газоабразивного потока;

- приведено обоснование выбора покрытий (выбранные составы покрытий - TiAl-TiAlN, Cr-CrC, NiCr/Cr-NiCrC/CrC), которые впоследствии были сформированы с использованием установок по формированию покрытий в вакууме «Гефест» и «Гефест ВИМР» на изготовленных образцах из лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ;

- проведены комплексные исследования составов, микротвердости, коэффициента трения и скорости изнашивания, стойкости к ударно- динамическим воздействиям защитных покрытий, сформированных на образцах из лопаточных сталей 20X13, 15X11МФ;

- разработана Методика исследований абразивной стойкости при высоких температурах (до 550° С) образцов из лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ без покрытий и с защитными покрытиями.

- проведены исследования кинетики процесса абразивного износа лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ при пяти значениях углов соударения (15, 30, 45, 60, 90 градусов) и при трех значениях скорости соударения газоабразивного потока частиц (130 м/с, 150 м/с, 170 м/с) с поверхностью образцов, при трех значениях температур поверхности образцов (25°С, 350°С, 550°С) и установлены основные параметры кинетики процесса абразивного износа, при которых наблюдается максимальный износ для каждой лопаточной стали (угол соударения 30°, скорость соударения газоабразивного потока частиц 170 м/с, температура поверхности образца 550°С);

- проведены исследования абразивной стойкости трех типов защитных покрытий (TiAl-TiAlN, Cr-CrC, NiCr/Cr-NiCrC/CrC) при угле соударения 30°, скорости соударения газоабразивного потока частиц 170 м/с, и при трех температурах поверхности образцов (25°С, 350°С, 550°С) и определена относительная абразивная стойкость исследуемых типов покрытий при высоких температурах (550°С). В результате проведенных исследований выявлено, что наилучшими результатами по относительной абразивной стойкости обладает покрытие на основе Cr-CrC толщиной 7 мкм (увеличение абразивной стойкости не менее чем в 3,5-4 раза);

- проведены исследования динамики разрушения поверхности и приповерхностного слоя образцов из лопаточной стали 20X13 и 15X11МФ без покрытий и с защитными покрытиями на этапе инкубационного периода процесса абразивного износа;

- проведены параметрические исследования, устанавливающие связь между толщиной и составом защитных покрытий и их абразивной стойкостью при высоких температурах (550°С), которые выявили, что с увеличением толщины покрытий возрастает в 6-7 раз относительная стойкость к абразивному износу по длительности инкубационного периода лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ с защитными покрытиями на основе TiAl-TiAlN и Cr-CrC (при толщинах 33 мкм и 11 мкм соответственно). В качестве экспериментального образца защитного покрытия выбрано покрытие на основе Cr-CrC толщиной 11 мкм.

В 2015 году в рамках 3 этапа (с 01 июля 2015 г. по 31 декабря 2015г.):

– с использованием установки по формированию покрытий в вакууме «Гефест ВИМР» на рабочих лопатках части высокого давления паровой турбины типа ПР-6 и образцах из лопаточных сталей 20X13 и 15X11МФ изготовлен экспериментальный образец защитного покрытия на основе Cr-CrC;

– проведены комплексные исследования толщины, состава, микротвердости, коэффициента трения и абразивной стойкости экспериментального образца защитного покрытия, которые показали, что изготовленный экспериментальный образец защитного покрытия на основе Cr-CrC толщиной 11 мкм является многослойным, общая толщина покрытия на лопатке составляет в среднем (10,8±0,7) мкм, микротвердость покрытия (Н0,05) составляет 1670±90 НВ. По результатам проведенных исследований абразивной стойкости выявлено, что экспериментальный образец защитного покрытия увеличивает в 6 раз стойкость лопаточного материала к абразивному износу в течение инкубационного периода.

– разработаны основы технологического процесса формирования защитных абразивостойких покрытий и проект лабораторного регламента на процесс их формирования;

– разработан проект Технического задания на проведение ОКР по теме: "Разработка и изготовление лабораторного образца экспериментальной установки для формирования абразивостойких защитных покрытий на элементах турбоустановок", что позволит модернизировать промышленное производство элементов воздушного и парового трактов турбоустановок (лопаточные аппараты компрессоров, первых ступеней

цилиндров высокого и среднего давлений паровых турбин). При этом прогнозируется обеспечение следующих показателей народно-хозяйственного эффекта:

- повышение срока службы элементов воздушного и парового трактов (лопаточные аппараты компрессоров, первых ступеней цилиндров высокого и среднего давлений паровых турбин) за счет многократного (в 3 раза) увеличения их стойкости к абразивному износу, что обеспечит снижение числа и трудоемкости ремонтов, снижение числа отказов оборудования и серьезных аварий;
- повышение КПД (до 1 %) за счет многократного снижения профильных потерь, вызванных абразивным износом поверхностей рабочих и сопловых лопаток проточной части компрессоров и ступеней высокого и среднего давлений паровых турбин;
- снижение вредного воздействия на окружающую среду за счет применения экологически чистых процессов формирования ионно-плазменных покрытий в вакууме.

– проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов, а именно оценка необходимых прямых реальных долгосрочных инвестиций для проведения опытно-конструкторской работы по созданию опытного образца установки для формирования защитных абразивостойких покрытий на элементах энергетических турбоустановок и выхода на рынок защитных покрытий для элементов энергетических турбоустановок, которая показала инвестиционную привлекательность и перспективы выхода на рынок формирования ионно-плазменных абразивостойких покрытий в сегменте защиты лопаток первых ступеней компрессоров с окупаемостью вложенных инвестиций и получением суммарного дохода за 10 лет равного 88,1 млн. рублей при объеме инвестиций 23,5 млн. рублей.

За счет софинансирования из внебюджетных источников проведены маркетинговые исследования рынка покрытий для элементов паротурбинных и газотурбинных установок, которые показали, что:

- увеличение парка газотурбинных установок в предыдущие годы в ближайшей перспективе окажет влияние на рост рынка услуг по нанесению покрытий на лопатки ГТУ, преимущественно турбин, ресурс которых значительно ниже, чем ресурс лопаток компрессора. Максимального значения за рассматриваемый прогнозный период (до 2020 г.) его объем достигнет в 2018 г. — 455 млн.руб.;
- сегмент нанесения покрытий на паровые турбины в 2016-2020 г. будет характеризоваться относительной стабильностью: годовой объем рынка нанесения покрытий на ремонтируемые лопатки ПТ — 19 млн.руб., на новые лопатки ПТ — 38-42 млн.руб.;
- доля ионно-плазменных (PVD) технологий на рынке в 2016-2020 гг. в среднем составит 25%.

В целях коммерциализации (практического использования) результатов интеллектуальной (научно-технической) деятельности, полученных в рамках проекта Исполнителя - ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» совместно с Индустриальным партнером - ООО «Эко Энерг» подготовлен проект технического задания на выполнение ОКР, проведены маркетинговые исследования рынка покрытий для элементов паротурбинных и газотурбинных установок и технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов и их дальнейшей коммерциализации.

Полученные научно-технические результаты будут использоваться Индустриальным партнером ООО «Эко Энерг» - организацией реального сектора экономики, как в своей повседневной деятельности, так и в разработке и создании новых способов защиты элементов энергетического оборудования.

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

3. Область применения результатов ПНИ

Область использования результатов ПНИ – теплоэнергетика и топливно-энергетический комплекс. Практические результаты выполненных исследований найдут широкое применение в тепловой и атомной энергетике, газовой промышленности и др. В качестве потенциальных потребителей результатов проекта могут выступать как крупные предприятия-изготовители турбинного и компрессорного оборудования, так и электростанции, заинтересованные в значительном снижении затрат на обслуживание и ремонт энергетического оборудования. Одними из крупнейших заинтересованных сторон в реализации проекта могут выступить следующие предприятия: НПО «Сатурн», НТЦ «Композит», ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС», ООО «Газпром энергохолдинг», ОАО «Силовые машины», ОАО «Турбоатом» и др.

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