

Достигнутые результаты при выполнении 1 этапа исследовательской программы «Научное обоснование и создание инфраструктуры на основе использования синхротронного излучения для диагностики функционально-градиентных материалов»

Грант Минобрнауки России Соглашение от 30.05.2025 № 075-15-2025-459

Разработана технология восстановления пера лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) энергетического назначения на никелевой основе с уровнем УГТ6. Подготовлен комплект технологической документации по ГОСТ 2.125-2008. Комплект технологической документации включает. Описание технологического процесса восстановления рабочих лопаток ГТД на основе никелевого сплава ЖС-32. Ремонт осуществляется путем лазерной наплавки на поверхность пера лопатки присадочного материала из никелевого жаропрочного сплавов. Описание технологического оборудования, включающего лазерный технологический комплекс, модуль подогрева, технологическую оснастку, материал наплавки, методы контроля качества в том числе и с использованием синхротронного излучения. Оценка уровня готовности технологии по УГТ6 (полнофункциональный прототип технологии). Включающий общую характеристику оценки, критерии соответствия УГТ6, акты испытаний индустриальным партнером ООО «БЭМ». В настоящее время по причине введенных санкций в России отсутствует возможность замены лопаток на новые и становится актуальной проблема восстановления и ремонта лопаток ГТД энергетических установок, разрушающихся в процессе эксплуатации. При разработке данной технологии был применен новый комплексный подход формирования функциональных материалов методом аддитивных технологий с использованием подогрева подложки, и использование экспериментального анализа для определения физико-механических свойств получаемого материала, принципиально отличающегося от основного материала, в сочетании с впервые проведенными исследованиями структурно-фазового состава с использованием синхротронного излучения.

Получены трехмерные данные о микроструктуре дефектов и трещин в исследуемых образцах лопаток газотурбинных авиационных двигателей (ГТД), предоставленных индустриальным партнером АО «БЭМЗ», методом синхротронной микротомографии в диапазоне от 2 до 70 мкм по точности и от 3 до 300 мм поля зрения. Результаты исследований открывают потенциал метрологического обеспечения для всех стадий технологического процесса восстановления лопаток ГТД на основе жаропрочных никелевых сплавов. Внедрение метрологического обеспечения томографического исследования структуры лопаток в технологический процесс восстановления позволит не только количественно оценивать параметры восстановления лопаток, но и рассмотреть возможность применения нормативной базы для аттестации

процесса залечивания и формирование основ для определения их летной годности на основе количественной оценки качества восстановления.

Создана исследовательская методика постановки и обработки данных рентгенографического эксперимента в условиях ударного воздействия на конструкционные материалы, которая позволяет получить рентгеновское кино в терминах приведенной плотности по всей длине процесса. Такие результаты позволяют проводить математическое моделирование и определять параметры уравнения состояния для широкого диапазона материалов и их структур. В перспективе уравнения состояния приведенных конструкционных материалов позволят создавать материалы и изделия с управляемыми свойствами еще до этапа изготовления и определять диапазон их применимости в тех или иных технологических приложениях.

Подана заявка на изобретение «Способ исследования неразъемных соединений с градиентной структурой, полученных сваркой трением с перемешиванием, с использованием синхротронного излучения», которое относится к области материаловедения и дает возможности определения изменения параметра кристаллической решетки в процессе деформации при растяжении неразъемных соединений с градиентной структурой, созданных сваркой трением с перемешиванием, возможности определения изменения деформации поверхности, а также возможности на основе проведенного анализа оценки связи деформированного состояния неразъемных соединений с градиентной структурой с параметром кристаллической решетки и деформацией поверхности.

Получены наплавки горных резцов, по своим свойствам превышающим свойства образцов, полученных по технологии традиционной порошковой металлургии. Разработана технология наплавки быстрорежущей сталью, образцов из стали Гадфильда, обеспечивающей наплавку без трещин и напряжений, и без использования промежуточного наплавочного слоя.

Проводятся промышленные испытания по определению ресурса полученных образцов ножей шнекозубчатой дробилки.

Проведены работы по адаптации и аттестации измерительных методик, для исследований, которые будут проводиться на строящемся источнике СИ 4+ поколения «СКИФ». Была проведена работа по подготовке к аттестации измерительной методики «Рентгенофлюоресцентный анализ с высоким пространственным разрешением». Полученные результаты показывают, что можно достичь определения концентрации редкоземельных элементов в образце на уровне 10⁻⁶ весовых процентов. Была проведена работа по подготовке к аттестации измерительной методики «Высокоразрешающая рентгеновская томография функционально-градиентных материалов, в процессе механического нагружения». Установлено что методика позволяет получать трехмерную структуру объекта с пространственным разрешением на уровне 3 мкм. Была проведена работа по подготовке к аттестации измерительной методики «Энергодисперсионная дифрактометрия с высоким

пространственным разрешением». Проведенные исследования показывают, что методика позволяет проводить трехмерное сканирование фазового состава образца с пространственным разрешением 100 мкм. Была проведена работа по подготовке к аттестации измерительной методики «1D-радиография со сверхвысоким временным разрешением для исследования ударных и взрывных процессов». Полученные данные показали, что методика позволяет регистрировать распространение ударной волны в объекте с временным разрешением 124 нсек. Была проведена работа по подготовке к аттестации измерительной методики «Малоугловое рентгеновское рассеяние со сверхвысоким временным разрешением для исследования ударных и взрывных процессов». Данная методика позволила регистрировать распределение размеров частиц в ударной волне от 2 до 100 нм с временным разрешением 611 нс. На базе инфраструктуры СЦСТИ были испытаны люминесцентные мониторы положения пучка СИ, которые будут использоваться на станции 1-1 «Микрофокус» синхротрона 4+ поколения «СКИФ». Также были проведены испытания прототипа оптики скользящего падения, которая будет использоваться на станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» для фокусировки пучка в вертикальном направлении. На базе инфраструктуры СЦСТИ разработана и аттестована измерительная методика «Высокоразрешающая рентгеновская ламинография плоских образцов», которая позволяет получать данные о трехмерной структуре образца с пространственным разрешением ± 3 мкм. Таким образом результаты исследований открывают потенциал метрологического обеспечения для исследования структуры и механических свойств, создающихся в рамках этого гранта функционально-градиентных материалов на высоком научном и технологическом уровне.

Выполнены электронно-микроскопические исследования микроструктуры никелевых сплавов и композитов с целью их характеристики в зависимости от технологических условий синтеза в сопоставлении с результатами, полученными синхротронными и смежными с ними методами анализа атомной структуры материалов.

По итогам конкурса «Рентгеновские, синхротронные, нейтронные методы для решения задач материаловедения» были отобраны 12 проектов молодых ученых. При успешной реализации данных проектов, был получен ряд значимых результатов. Отработаны дифракционные методики исследования функционально-градиентных материалов на основе никелевых сплавов и стабильности. Изучено влияние температурного градиента на структурно-фазовый состав Inconel 939 при селективном лазерном сплавлении. В интересах развития инфраструктуры синхротронных исследований разработаны рабочие варианты оптических схем планируемых станций второй очереди ЦКП «СКИФ» – «Монокристалл» (in situ и operando рентгеноструктурный анализ с высоким пространственным и временным разрешением) и «РФА-Геология» ЦКП «СКИФ». Выполнены расчёты

ключевых параметров генерирующей структуры и канала вывода ИК-излучения в рамках разрабатываемого проекта станции «ИК-диагностика» синхротронного источника «СКИФ». Разработаны архитектура цифрового двойника конфокального рентгеновского микроскопа Экспериментальной станции 1-1 «Микрофокус» ЦКП «СКИФ и прототип цифрового двойника регулируемой маски фронтенда ЦКП «СКИФ». Результаты работы будут использованы при создании комплексного цифрового двойника всего ЦКП «СКИФ». Методика скоростной рентгенографии с использованием синхротронного излучения применена для определения ударно-волновой сжимаемости политетрафторэтилена вдоль луча синхротронного излучения за фронтом мощной ударной волны в реальном времени. Методом рентгеновской компьютерной микротомографии исследована динамика изменения пор в твердых образцах энергетических материалов в процессе термоциклирования. Разработана лабораторная методика исследования внутренней структуры и механизмов разрушения наполненного полимерного композита с помощью синхротронного излучения.

Разработана программа дополнительного профессионального образования (программа повышения квалификации) «Использование синхротронного излучения для решения задач материаловедения» (72 часа, из которых 38 часов аудиторной работы). По этой программе прошли обучение и получили удостоверения государственного образца 10 слушателей.

В период с 13 по 15 ноября 2025 г. проведена IV Школа молодых ученых по синхротронным методам исследования в материаловедении. В работе Школы приняли участие 117 человек (в том числе, 104 молодых ученых), представлявших 36 организаций. Представлено 7 пленарных докладов, мастер-класса.