

ОТЗЫВ

научного руководителя, д.т.н., профессора Шатульского Александра Анатольевича о диссертационной работе Игнатъева Захара Евгеньевича «Разработка методов управления процессом формирования структуры поверхностного слоя рабочей лопатки ГТД при нанесении теплозащитных покрытий», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертационная работа Игнатъева З.Е. посвящена решению актуальной задачи – повышению ресурса рабочих лопаток ГТД (ответственных деталей ГТД) на основе разработки методов управления формированием макро- и микроструктуры поверхностного слоя рабочих лопаток ГТД на основе совершенствования теории и технологии нанесения теплозащитных покрытий.

В качестве объекта исследования были выбраны образцы отливок, изготовленных из монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов ЖС32-ВИ и СЛЖС5-ВИ, а также из поликристаллического сплава ЧС88У-ВИ. В качестве материалов, используемых при формировании теплозащитных покрытий согласно серийной технологии, были использованы: для формирования жаростойкого металлического подслоя, сформированного ионно-плазменным методом, - катод марки СДП-1 (Ni - основа, 18...22 % Co, 18...22 % Cr, 11...13 % Al, 0,2...0,6 % Y); для внешнего теплоизоляционного слоя, сформированного электронно-лучевым осаждением - 8YSZ (ZrO₂ - основа, Y₂O₃ - 6...8 %). Предложенные жаростойкие микрослои на основе Ni-Al были нанесены электронно-лучевым испарением.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований соискателем проведен анализ дефектов теплозащитных покрытий, получаемых по серийной технологии электронно-лучевым осаждением в вакууме, а также способам их устранения.

Проведена оценка влияния подготовительных операций перед нанесением теплозащитных покрытий на структуру и свойства материала лопаток турбин. Установлено, что в результате пескоструйной и механической обработок на поверхности лопатки образуется наклепанный слой. Для монокристаллических лопаток это создает опасность появления на поверхности «паразитных» зёрен, что зачастую приводит к снижению их эксплуатационных свойств.

Выполнен анализ технологических факторов, влияющих на структуру и свойства теплозащитных покрытий, сформированных электронно-лучевым методом с осаждением в вакууме. Установлено, что ток нагрева испаряемого керамического штабика при электронно-лучевом нанесении влияет на количество испаряемого вещества, а значение тока подогрева поверхности защищаемого материала оказывает влияние на структуру конденсированного керамического слоя. На основании обработки производственных данных была разработана математическая зависимость, позволяющая оценить влияние параметров нанесения на толщину покрытий, сформированных электронно-лучевым осаждением в вакууме.

Для снижения окисления жаростойкого слоя и обеднения его алюминием были рассмотрены различные технологии повышения фазовой стабильности поверхностного слоя сплавов. Наиболее эффективной оказалась технология нанесения теплозащитных покрытий с дополнительными слоями алюминид никеля, при которой на жаростойкий и на теплозащитный слои наносился металлический слой Ni-Al. Дополнительный слой Ni-Al на поверхности жаростойкого слоя способствовал сохранению фазовой стабильности основного жаростойкого слоя и, в конечном счете, обеспечил повышение фазовой стабильности защищаемого сплава в результате снижения диффузии Al из сплава в покрытие в условиях длительной эксплуатации.

При выполнении диссертационной работы Игнатъев З.Е. проявил себя как грамотный специалист, способный решать комплексные аналитические и технологические проблемы материаловедческого характера применительно к процессам получения, оценки и

исследования теплозащитных покрытий. Соискателем получен ряд значимых результатов, научная новизна, достоверность и объективность которых не вызывает сомнения. Разработанные технологии, технологические принципы и рекомендации востребованы современной промышленностью, о чём свидетельствуют прилагаемые акты внедрения.

Результаты, полученные в ходе диссертационных исследований Игнатьева З.Е., используются в учебном процессе РГАТУ, являясь составной частью оригинальных лекционных курсов для проведения практических и лабораторных занятий со студентами. Он активно участвует в научных мероприятиях различного уровня.

В целом соискателем успешно решены поставленные перед ним задачи, в полной мере реализованы планы исследований, что очевидным образом отражает содержание автореферата и диссертационной работы.

Результаты работы достаточно полно опубликованы в 11 научных работах, из них 6 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Считаю, что диссертация Игнатьева Захара Евгеньевича выполнена на актуальную тему, представляет собой законченную работу, обладающую несомненной научной новизной, практической значимостью и внутренней целостностью, удовлетворяет требованиям ВАК, а диссертант является сложившимся научным исследователем и заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Материаловедение, литье и сварка»,
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени П.А.
Соловьева»

25 марта 2026 г.

Шатульский Александр
Анатольевич

152934, г. Рыбинск, ул. Кирова, д.36, кв.14
Телефон; 8-906-635-82-25
e-mail: shatul'sky@rsatu.ru

Подпись А.А. Шатульского удостоверяю:

Врио Ученого секретаря Ученого совета
РГАТУ имени П. А. Соловьева



Архарова Н.В..