

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Игнатъева Захара Евгеньевича «РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО  
СЛОЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ГТД ПРИ НАНЕСЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ  
ПОКРЫТИЙ», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности

2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

### **Актуальность темы исследования.**

Повышение рабочей температуры на поверхности охлаждаемых лопаток влечёт за собой ужесточение требований к используемым материалам. Разработка новых жаропрочных сплавов осложняется ввиду того, что ряд основных легирующих элементов литейных никелевых сплавов, полезных с точки зрения жаропрочности (молибден, вольфрам, ванадий, тантал, рений, рутений) оказывает отрицательное действие на жаростойкие свойства. Обезлегиrowание поверхностного слоя деталей в условиях высокотемпературной эксплуатации алюминием и хромом ухудшает эксплуатационные свойства деталей. Более того, незначительное количество солей щелочных металлов, в особенности  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в результате попадания морской воды или сгорания топлива, содержащего микропримеси натрия и серы, приводит к катастрофическому разрушению жаропрочных сплавов вследствие высокотемпературной коррозии. По этим причинам применение теплозащитных покрытий на поверхности рабочих лопатках турбин является технологически, технически и экономически целесообразным с точки зрения повышения ресурса защищаемых деталей.

Необходимость защиты охлаждаемых лопаток от воздействия теплового потока требует, чтобы современные защитные покрытия обладали не только высокой жаростойкостью и коррозионной стойкостью, но и служили термическим барьером для теплового излучения продуктов сгорания топлива. Особого внимания в области технологии защиты лопаток ГТД заслуживают теплозащитные покрытия, получаемые электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме. Получаемые таким способом керамические покрытия обладают сегментированной столбчатой структурой, наиболее эффективно повышающей термостойкость в условиях термоциклических нагрузок. Однако, несмотря на многочисленные

исследования отечественных и зарубежных ученых, до настоящего времени недостаточно внимания уделялось изучению особенностей формирования структуры керамических покрытий, наносимых электронно-лучевым испарением в вакууме, а также комплексному влиянию структуры и фазового состава покрытий на их защитные свойства. По этой причине представленная работа, посвященная повышению ресурса рабочих лопаток ГТД за счет разработки и внедрения методов обеспечения требуемой структуры и фазового состава поверхностного слоя при нанесении теплозащитных покрытий, является несомненно актуальной.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** В диссертационной работе Игнатьева З.Е. представлены результаты исследований и испытаний, направленных на повышение ресурса рабочих лопаток ГТД на основе развития теоретических и технологических аспектов формирования микроструктуры поверхностного слоя при нанесении теплозащитных покрытий.

Основное содержание диссертации изложено в 11 печатных работах. 6 работ опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ. На способ определения толщины покрытия получен патент на изобретение № 2753846. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Материалы изложены на 202 страницах машинописного текста, содержат 144 рисунка, 34 таблицы и список литературы из 77 источников.

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, дана общая характеристика диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** автором представлена подробная характеристика теплозащитных покрытий. Показано, что выполнение требований, предъявляемых к современным двигателям, связано как с развитием жаропрочных никелевых сплавов и технологий изготовления ответственных деталей из них, так и с применением теплозащитных покрытий. Отмечено, что в настоящее время существует и активно используется несколько технологий нанесения покрытий, однако при их реализации выявляется множество проблем, связанных с обеспечением размерной точности и

прогнозированием их свойств. Многие вопросы, связанные с формированием поверхностного слоя деталей, с технологиями получения и свойствами керамических теплоизоляционных слоёв, до сих пор остаются нерешёнными. Поэтому развитие теоретических аспектов нанесения теплозащитных покрытий наряду с разработкой новых материалов и технологий являются актуальными задачами для современного двигателестроения. Это позволило сформулировать цель и задачи исследований

Во **второй главе** представлена методология проведения исследований. Описаны состав и свойства используемых материалов, методы формирования покрытий. Представлены методы проведения термоциклических, изотермических и коррозионных испытаний. Рассмотрена выбранная методология анализа микроструктуры, свойств, химического и фазового анализа покрытий и защищаемых сплавов.

В **третьей главе** проанализирован опыт серийной технологии нанесения теплозащитных покрытий. Автором сформулирован вывод о том, что дефекты теплозащитных покрытий можно условно разделить на две группы: дефекты, образовавшиеся при нанесении покрытий; дефекты, образовавшиеся при вспомогательных операциях изготовления покрытий. При этом дефекты, выявленные визуальным контролем, поддаются устранению, несмотря на увеличение сроков выпуска продукции и её удорожание. Однако наибольшую опасность представляют скрытые дефекты, выявление которых невозможно на этапе изготовления и контроля. Такие дефекты проявляются только при испытаниях или эксплуатации, ставя под угрозу работоспособность всего двигателя в целом.

**Четвертая глава** посвящена оценке влияния подготовительных операций перед нанесением теплозащитных покрытий на структуру и свойства материала лопаток турбин. Показано, что лопатки перед нанесением покрытия традиционно проходят несколько подготовительных технологических операций. 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 по причине растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. Степень механического воздействия (на примере пескоструйной обработки – минимальное давление на выходе сопла в 1,5 атм.) приводит к

формированию рекристаллизованных зёрен на поверхности при температуре выше 1000°С и времени выдержки более 2 часов. В ходе проведенного анализа альтернативных способов подготовки поверхности было установлено, что наиболее перспективными методами являются электрохимические способы обработки. Автором предложены новые технологии подготовки поверхности: комбинированный метод подготовки поверхности для поликристаллических лопаток, сочетающий пескоструйную обработку поверхности с последующей электрохимической обработкой для обеспечения оптимальных показателей производительности, низкой шероховатости и минимального загрязнения поверхности деталей; электрохимический метод для монокристаллических лопаток, а именно электролитно-плазменная полировка благодаря своей технологичности.

**В пятой главе** выполнен анализ технологических факторов, влияющих на структуру и свойства теплозащитных покрытий, сформированных электроннолучевым 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. Показано влияние расположения лопаток в вакуумной камере установки на микроструктуру при формировании керамических покрытий. Расположение лопатки на одной оси со штоком установки позволило получить однородное по толщине керамическое покрытие с вертикально ориентированными столбчатыми кристаллами керамического покрытия. На основании анализа и обработки производственных данных и лабораторных исследований была разработана математическая зависимость, позволяющая оценить влияние параметров нанесения на толщину покрытий, сформированных электронно-лучевым осаждением в вакууме.

**В шестой главе** рассмотрены технологии улучшения эксплуатационных свойств теплозащитных покрытий, нанесенных электронно-лучевым испарением в вакууме. Для снижения окисления жаростойкого слоя и обеднения его алюминием были проанализированы 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. Показано, что этот слой обеспечивает сохранение фазовой стабильности основного жаростойкого слоя и, в конечном счете, повышение фазовой стабильности защищаемого сплава в результате снижения диффузии Al из сплава в покрытие в условиях длительной эксплуатации и солевой коррозии. Испытания на адгезионную прочность методом склерометрии также подтвердили преимущество разработанной технологии с дополнительными микрослоями моноалюминида никеля по сравнению с теплозащитным покрытием, изготовленным по серийной технологии (СДП + ТЗЦ).

**Седьмая глава** посвящена производственному опробованию разработанных систем теплозащитных покрытий. Испытания разработанных систем теплозащитных покрытий были проведены на установке, имитирующей поток продуктов сгорания углеводородного топлива в условиях высокотемпературной солевой коррозии при температуре  $1000 \pm 50$  °С. Образцы с нанесенными на их поверхности системами покрытий прошли испытания на базе 100 циклов. Введение дополнительного слоя Ni–Al, сформированного электронно-лучевым испарением с конденсацией из паровой фазы, повышает защиту основного жаростойкого слоя в условиях, схожих с условиями работы ГТД по сравнению с традиционной системой теплозащитного покрытия.

**Новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** В качестве наиболее важных научных результатов диссертационной работы Игнатьева З.Е. следует отметить выявление механизма влияния на структуру и свойства керамических теплозащитных покрытий основных технологических параметров установки при электронно-лучевом осаждении в вакууме, в частности тока подогрева и числа оборотов штока установки и доказательство того факта, что совместное варьирование этих параметров позволяет в широком диапазоне изменять микроструктуру покрытия, а, следовательно, и эксплуатационные свойства лопаток ГТД. Интерес представляет также и новый состав теплозащитного покрытия, отличающийся формированием дополнительного микрослоя на основе моноалюминида никеля между основным жаростойким и керамическим слоями или на поверхности керамического покрытия, что позволяет повысить долговечность теплозащитного покрытия в условиях высокотемпературных

циклического (в среднем на 78 %) и коррозионного (в среднем на 18 %) воздействий

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** В диссертационной работе Игнатьева З.Е. установлены закономерности изменения макро- и микроструктуры, фазового и химического состава поверхностного слоя лопатки в зависимости от параметров технологического процесса нанесения покрытия, разработан и опробован в условиях производства технологический процесс нанесения теплозащитных покрытий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками, экспериментально-аналитический метод контроля толщины покрытий, основанный на математической зависимости параметров процесса, а также методика выбора параметров процесса нанесения покрытия на рабочие лопатки ГТД.

Предложен новый способ подготовки поверхности перед нанесением теплозащитных покрытий, включающий механическую очистку с электролитической полировкой для обеспечения структурной и фазовой стабильности поверхностного слоя рабочих лопаток турбин ГТД.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным применением фундаментальных материаловедческих и теплофизических закономерностей, использованием методов математической статистики для обработки результатов экспериментов и подтверждается хорошим совпадением результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также положительным результатом при опробовании результатов исследований в производственных условиях.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Диссертационная работа в достаточной объеме раскрывает структурные и фазовые особенности металлического жаростойкого слоя системы Ni – Co – Cr – Al – Y. Однако анализ технологий и материалов западных стран в области жаростойких покрытий показал, что основным материалом, выступающим в качестве металлического слоя для лопаток турбин, является алюминид платины Pt – Al (патент WO2010134976A1 «Pt-al-hf/zr coating and method»). К сожалению, в диссертации Игнатьева З.Е. данный материал не рассматривается как альтернатива существующим жаростойким материалам.

2. В главе 2 в качестве основного испытательного оборудования для проведения термоциклических испытаний указана высокотемпературная муфельная печь. Исходя из анализа конструкции печи, термоудар при испытаниях покрытий обеспечивался за счет открытия дверцы печи и вытаскивания оснастки с образцами покрытий для последующего охлаждения. Подобные ручные процедуры при увеличивают длительность, стоимость и трудоемкость испытаний.
3. Для анализа микроструктуры и фазового анализа защищаемого материала и разработанных систем покрытий использовались средства оптической и электронной микроскопии. Однако в работе не указаны конкретные методы анализа изображений, виды получения изображений и информации при работе с растровым электронным микроскопом. Также отсутствуют пояснения по методу анализа химического состава материалов.
4. Целесообразно было бы более подробно описать пределы применимости полученной автором математической зависимости толщины покрытия в зависимости от особенностей геометрии пера лопатки, схемы загрузки и взаимного расположения лопаток в рабочей камере установки;

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы в отраслях промышленности, занимающихся разработкой новых конструкционных материалов и технологий для эксплуатации в условиях воздействия высоких температур, коррозионной среды, динамических и статических нагрузок. Теоретические и практические результаты также пригодны для научно-педагогической деятельности высшего технического образования с целью подготовки инженерно-технических кадров в области порошковой металлургии и композиционных материалов, материаловедения и смежных отраслей.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней.**

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Игнатьева З.Е. выполнена на актуальную тему, и является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-

техническом уровне, с привлечением современных методов теоретических и экспериментальных исследований. Она вносит значительный научный и практический вклад в развитие методов нанесения защитных покрытий направлена, прежде всего, на решение важнейшей практической задачи повышения ресурса рабочих лопаток турбин ГТД за счет разработки методов управления процессом формирования структуры поверхностного слоя при нанесении теплозащитных покрытий.

Диссертационная работа Игнатъева З.Е. отвечает требованиям п.9, п.10, п. 11, п. 12, п. 13, п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842), а её автор Игнатъев Захар Евгеньевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Официальный оппонент, заведующий  
кафедрой Материаловедения  
профессор, докт. техн. наук  
по специальности 5.02.10  
Сварка и родственные процессы  
и технологии



25.05.2026

Овчинников  
Виктор  
Васильевич

ФГАОУ ВО Московский политехнический университет,  
107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д.38  
E-mail : [vicov1956@mail.ru](mailto:vicov1956@mail.ru)  
Телефон 8 962 967-55 -11

Подпись Овчинникова В.В. удостоверяю

