

## ОТЗЫВ

научного консультанта, д.ф.-м.н., профессора Борисова Анатолия Михайловича о диссертационной работе Савушкиной Светланы Вячеславовны «Механизмы формирования и свойства коррозионностойких и теплозащитных покрытий на основе оксидов циркония, гафния и алюминия, получаемых в плазменных процессах синтеза в вакууме и электролитах», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертационная работа Савушкиной С.В. посвящена решению актуальной задачи – разработке научно-обоснованных механизмов получения коррозионностойких и теплозащитных слоев из высокотемпературных оксидов с нанокompозитной и градиентной структурой для решения задач атомной энергетики, ракетно-космической техники и машиностроения на основе установленных в работе закономерностей влияния их структуры и фазового состава на функциональные характеристики. При решении этой задачи было проведено моделирование и экспериментальные исследования процессов формирования нанокompозитных и наноструктурных покрытий при плазменных воздействиях в вакууме и электролитах, исследование их структурных характеристик, развитие методик их анализа с использованием ядерно-физических методов и найдены следующие закономерности 1) влияние ниобия в цирконии на увеличение скорости формирования барьерного слоя при плазменном электролитическом оксидировании; 2) стабилизация тетрагональной модификации оксида циркония при плазменном электролитическом оксидировании циркониевого сплава в электролите-суспензии; 3) инкорпорирование наночастиц оксида иттрия в оксидный слой при плазменном электролитическом оксидировании за счет заполнения электролитом пор и функционирования микроразрядов, а субмикронных частиц при попадании в зоны действия микроразрядов со стороны поверхностного слоя; 4) структурно-наследственная связь «спеченный сплав-покрытие» при формировании коррозионностойкого покрытия плазменным электролитическим оксидированием композиционных материалов на основе алюминия; 5) формирование наноструктурных и нанокompозитных слоев на основе оксидов циркония и гафния, включающих области смешенного состава, обладающие свойствами среднеэнтропийных оксидов, с использованием течения Прандтля-Майера.

Найденные механизмы формирования нанокompозитных покрытий с использованием плазменного напыления сверхзвуковой струей с разрежением и при плазменных воздействиях в электролитах представляет особый интерес, поскольку позволяют регулировать структуру и свойства защитных слоев, например, создавать покрытия со структурой, близкой к высокоэнтропийным материалам. Кроме того, актуальна затронутая в диссертационной работе проблема формирования коррозионностойких оксидных покрытий для защиты композиционных материалов, поскольку их структура и функциональные характеристики сильно зависят от структуры основы, качества ее поверхности, определяющегося предварительной обработкой, типа упрочняющих фаз и структурной неоднородности материала.

В качестве объектов исследований были выбраны формируемые при плазменных воздействиях в вакууме и электролитах покрытия на основе диоксидов циркония, гафния и алюминия на циркониевых, медных и алюминиевых сплавах, широко применяемых и перспективных для применения в атомной энергетике и ракетно-космической технике. В ходе проведения исследований соискателем были разработаны и использованы оригинальные подходы по формированию и улучшению функциональных характеристик покрытий, в том числе, разработана конструкция сверхзвукового сопла с разворачивающим насадком, в котором происходит конденсация наночастиц из паровой фазы напыляемого материала, и позволяющая формировать наноструктурные или нанокompозитные покрытия, а также апробированы оригинальные методики анализа характеристик получаемых слоев, в том числе

механизмы получения информации о послыном составе и общей пористости покрытий с использованием спектрометрии ядерного обратного рассеяния протонов.

При выполнении диссертационной работы Савушкина С.В. проявила себя как грамотный специалист, способный решать комплексные аналитические и технологические проблемы материаловедческого характера применительно к процессам получения и диагностики функциональных покрытий. Соискателем получен ряд значимых результатов, научная новизна, достоверность и объективность которых не вызывает сомнения. Разработанные методики, технологические принципы и рекомендации востребованы современной промышленностью, о чём свидетельствуют прилагаемые акты внедрения. Результаты данной диссертационной работы, в частности, и научной деятельности соискателя, в целом, явились весомым вкладом при выполнении договоров и контрактов, выполняемых творческим коллективом кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ (НИУ), а также при выполнении грантов РФФИ и РФФИ.

Методики и результаты, полученные в ходе диссертационных исследований Савушкиной С.В., используются в учебном процессе МАИ, являясь составной частью оригинальных лекционных курсов и методических разработок для проведения практических и лабораторных занятий со студентами. Она осуществляет научное руководство студенческими выпускными дипломными работами, участвует в научных мероприятиях различного уровня.

В целом соискателем успешно решены поставленные перед ней задачи, в полной мере реализованы планы исследований, что очевидным образом отражает содержание диссертационной работы. Результаты работы достаточно полно опубликованы в печатных изданиях, в том числе, в журналах из списка ВАК, доложены на всероссийских и международных научных конференциях.

Считаю, что диссертация Савушкиной Светланы Вячеславовны выполнена на актуальную тему, представляет собой законченную работу, обладающую научной новизной, практической значимостью и внутренней целостностью, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а соискатель является сложившимся научным исследователем и заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технологии производства  
приборов и информационных систем управления  
летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (Национальный  
исследовательский университет)»

Наименование специальностей, по которым защищена  
диссертация: 01.04.08 – Физика плазмы; 01.04.01 –  
Приборы и методы экспериментальной физики

Адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80,  
ГСП-3, 125993. Тел. +7 (495)915 5441, +7 (916) 337  
5914

e-mail: anatoly\_borisov@mail.ru



Борисов Анатолий Михайлович

« 13 » 07 2022 г.

Подпись А.М. Борисова заверяю

