



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»  
(ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Вадковский пер., д. 1, Москва, ГСП-4, 127994. Тел.: (499) 973-30-76. Факс: (499) 973-38-85  
E-mail: [rector@stankin.ru](mailto:rector@stankin.ru)

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной  
деятельности ФГБОУ ВО  
«Московский государственный  
технологический университет  
«СТАНКИН»



Колодяжный Д. Ю.  
*шафта* 2023 г.

ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» на диссертационную работу Лабутина А.А. «Разработка синтеза малогабаритных оболочечных конструкций из слоистого композита Nb/Mo с защитным покрытием на основе метода магнетронного распыления», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

**Актуальность работы.**

Повышение надежности космических аппаратов (КА), обеспечивающей гарантийный срок их активного существования на орбите, является стратегическим направлением развития современного производства космической техники. Для решения этой задачи необходимо обеспечить повышение технических характеристик различных узлов и систем современных КА, что в свою очередь требует создания новых материалов с повышенными свойствами, а также методов переработки их в готовые

изделия. Так, например, разработка камер сгорания двигателей малой тяги требует решения весьма сложных проблем изготовления неохлаждаемых малогабаритных камер, представляющих собой оболочечные конструкции с переменным радиусом кривизны по длине изделия. Важной задачей является нанесение качественного защитного покрытия на внутреннюю стенку малогабаритной оболочки. В связи с существенным развитием в настоящее время исследований в области создания КА многоразового использования разработка эффективных методов получения оболочечных конструкций с повышенными характеристиками весьма актуальна, что невозможно без применения высококачественных композиционных материалов.

Наиболее подходящими для создания оболочечных конструкций КА являются слоистые металлокомпозиты, широко применяемые в аэрокосмических и других отраслях промышленности. Толщина слоев композитов варьируется от одного до 100 микрон. Эффективными методами формирования тонких слоев являются различные вакуумные методы нанесения покрытий. Они позволяют напылять как слои металлов, так и различные химические соединения – оксиды, нитриды, карбиды и другие. К настоящему времени методом вакуумно-дугового напыления были изготовлены тонкостенные жаропрочные камеры. Однако низкая производительность метода и некоторые негативные свойства композитов показали необходимость продолжения работ. В этой связи диссертационная работа Лабутина А.А., посвященная исследованиям и разработке эффективного метода изготовления различных неохлаждаемых малогабаритных оболочечных конструкций, в том числе камер сгорания двигателей малой тяги, из жаропрочного слоистого металлокомпозита с жаростойким покрытием на ее внутренней стенке является актуальной.

#### **Общая характеристика работы для исследований**

Автором в работе представлен аналитический обзор литературы по современному состоянию исследований в области создания узлов и деталей КА из жаропрочных композиционных материалов в виде оболочечных конструкций, включая камеры сгорания малогабаритных двигателей. На основе проведенного автором анализа обоснован выбор состава спытного слоистого композита Nb/Mo, у которого обеспечивается отсутствие образования интерметаллидных фаз, поскольку в системе Nb-Mo существует неограниченная взаимная растворимость компонентов.

В работе была представлена новая базовая методика синтеза тонкостенных оболочечных конструкций из металлокомпозита, изготавливаемых послойным напылением чередующихся слоев инвертированными магнетронами на оправку, имеющую форму поверхности, обратную по отношению к необходимой форме внутренней стенки оболочки.

После напыления слоев оправка удаляется методом селективного химического травления. Для реализации методики разработана схема из 3-х инвертированных и одного пост-катодного магнетронов и на ее основе была создана экспериментальная установка напыления. При этом была использована модернизированная автором конструкция инвертированных магнетронов.

Большое внимание автором уделено определению оптимальных параметров нанесения на медную трубку покрытий из Nb и Mo, а также многослойных Nb/Mo покрытий применительно к разработке технологии получения тонкостенных композитов. С учетом результатов этих исследований были выбраны оптимальные параметры процесса формирования металлокомпозита магнетронным распылением.

Автор также исследовал химический и структурно-фазовый состав, структуру, морфологию и остаточные напряжения композита. Было установлено, что с увеличением напряжения смещения происходит снижение толщины обоих покрытий и увеличиваются плотность столбчатой структуры и ширина дифракционных линий, которая определяется искажениями кристаллической решетки и измельчением субзеренной структуры в диапазоне 10-100 нм. Получено многослойное ( $n=120$ ) покрытие Nb/Mo толщиной  $\sim 800$  мкм, в котором формируются остаточные напряжения, составляющие  $-576$  МПа в подповерхностном Mo слое и  $-213$  МПа в наружном Nb слое, что значительно ниже, чем в монослойных покрытиях толщиной 10 мкм. В результате исследований разработана опытная гибридная технология на базе магнетронного напыления изготовления сложнопрофильной тонкостенной оболочечной конструкции из слоистого композита Nb/Mo с жаростойким покрытием на внутренней стенке, произведенным силицированием и изготовлены макеты камер сгорания малогабаритных двигателей КА.

#### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы Лабутина А.А. заключается в разработке методики создания тонкостенных жаропрочных оболочечных конструкций с постоянной или переменной по длине изделия кривизной из слоистых металлокомпозитов на основе магнетронного напыления.

Установлены зависимости текстуры и внутренних напряжений в молибденовых покрытиях от напряжения смещения на подложке при магнетронном напылении, что позволяет найти оптимальные значения напряжения смещения, обеспечивающие образование плотной структуры покрытия при достаточной адгезии покрытия к подложке при формировании оболочечных конструкций из слоистых металлокомпозитов Mo/Nb.

Предложен и обоснован механизм взаимной компенсации термических напряжений в слоях многослойных покрытий Mo/Nb.

### **Практическая значимость работы**

Наиболее значимым для практики результатом работы является разработка опытной технологии изготовления тонкостенной оболочечной конструкции с постоянным и переменным по длине изделия радиусом кривизны из слоистого композита Nb/Mo на базе напыления слоев системой инвертированных магнетронов, опытной гибридной технологии и изготовление макетов камер сгорания малогабаритных двигателей КА с жаростойким покрытием на внутренней стенке.

Следует отметить также создание современного оборудования для изготовления системой инвертированных магнетронов многослойных тонкостенных оболочечных конструкций из металлокомпозитов без капельной фазы в напыленных слоях.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается необходимым объемом экспериментальных исследований, применением комплекса современных методов исследования поверхности материалов, использованием сертифицированного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений.

### **По работе можно сделать следующие замечания:**

1. Положения, выносимые на защиту, не содержат конкретных закономерностей, установленных в работе.
2. Не приведена чистота состава Nb и Mo мишеней – стр. 30.
3. Не указан порядок проведения операций на этапе увеличения толщины оболочки на критической части дополнительным напылением слоя Nb с применением масок – стр. 89. Для этого нужен этап перезагрузки образца.
4. В работе отсутствует время вытравливания оправки на образце типа камера сгорания – стр. 91.
5. Чрезмерное использование сокращений и отсутствие их в отдельном списке затрудняет восприятие работы.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации.

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по синтезу тонкостенных оболочечных конструкций с постоянным и переменным радиусом кривизны по длине изделия из жаропрочных слоистых металлокомпозитов на основе напыления слоев магнетронными распылительными системами с

жаростойким покрытием на внутренней стенке и управлению их составом и структурой.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 7 научно-технических конференциях, опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в 4 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической технике, а также в других отраслях промышленности.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Лабутин Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Отзыв рассмотрен на заседании НТС «Центра новых материалов и технологий», протокол № 3 от 3 марта 2023 года. На заседании присутствовало 10 членов из 12. Результаты голосования: «за» 10, против – нет, воздержавшихся - нет.

Директор центра  
Доктор технических наук,  
профессор



Суминов Игорь Вячеславович