

На правах рукописи



Григоровский Вячеслав Валерьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЗНОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ, ГЕТЕРОГЕННЫМ, СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ**

Специальность 1.3.14
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Никитин Пётр Васильевич,

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Алексеев Алексей Кириллович,

доктор физико-математических наук, ПАО РКК
«Энергия» имени С.П. Королёва, главный
научный сотрудник

Чирков Алексей Юрьевич,

доктор физико-математических наук, МГТУ им.
Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой
«Теплофизика»

Ведущая организация:

Военно-промышленная корпорация «НПО
Машиностроения»

Защита состоится «22» декабря 2025 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу 125993, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:
https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186084

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.327.06

д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень её разработанности.

В промышленности большинство машин и механизмов (примерно, 85%) эксплуатируются в сильно агрессивных средах, лишь около 10-15% изделий работают в неагрессивных средах. Долговечность этих изделий напрямую связана с обеспечением эффективной защиты их поверхностей от коррозии, эрозии и износа. На данный момент около 30% ежегодного производства металлов используется для восполнения потерь, обусловленных указанными выше процессами.

Современные темпы развития промышленности таковы, что традиционные конструкционные материалы уже не могут обеспечить необходимое увеличение ресурса при эксплуатации техники в экстремальных условиях. Поэтому становится целесообразным искать принципиально новые научные подходы к выбору материалов и их защиты, начиная с этапа проектирования. Например, композиционные материалы на основе тугоплавких металлов, таких как молибден, вольфрам, tantal и ниобий, требуют обязательного нанесения защитных покрытий, так как имеют низкую термостойкость и высокую степень окисления при температурах выше 1000 К.

Применение защитных покрытий позволит продлить срок службы, снизить затраты на производство и эксплуатацию машин и механизмов. Это подчёркивает важность разработки защитных покрытий как одного из основных способов повышения долговечности деталей машин, механизмов и металлоконструкций.

Особую роль защитные покрытия выполняют в теплонапряженных элементах конструкции высокоскоростных ЛА и силовых двигательных установках, таких как носовые обтекатели ВЛА, детали турбин ГТД, сопла ЖРД. Для указанных элементов покрытия должны выполнять две функции:

- защитного барьера от проникновения химически активных компонентов высокотемпературного набегающего потока воздуха (O_2 , O, N) к поверхности тепловой защиты;
- покрытия должны обладать низкой каталитической активностью.

В настоящее время в качестве материалов перспективной тепловой защиты ВЛА и их двигателей используется УУКМ и УУККМ. Эти материалы обладают высокой рабочей температурой поверхности (2500-3000 К). Однако они в открытой форме имеют низкую термостойкость в связи с тем, что углерод активно реагирует с молекулами и атомами кислорода (O_2 , O), а также атомами азота, N. Чтобы устранить этот недостаток указанные типы

теплозащитных материалов покрываются тонкой термостойкой барьерной плёнкой (до 100-150 мкм). Разработка таких покрытий в настоящее время является проблемной научной задачей. Для решения этой задачи в Московском Авиационном Институте был разработан «Холодный Газодинамический Метод» в последствии получивший развитие как Низкотемпературный Газодинамический Метод нанесения покрытий, а также спроектировано и изготовлено уникальное оборудование для реализации НТГДМ, описание которого приводится в главе 2.

Разрабатываемая технология нанесения покрытий, благодаря своим особенностям, имеет широкий спектр применений, ниже перечислены некоторые возможности технологии:

- Нанесение тонких термостойких барьерных покрытий для деталей из УУКМ и УУККМ;
- нанесение износостойких покрытий;
- коррозионностойких покрытий;
- электроизоляционные покрытия и другие.

Дальнейшая разработка и совершенствование НТГДМ является сложной и наукоёмкой задачей. Эта задача определяет высокую актуальность данной квалификационной работы.

Целью работы является разработка научно обоснованной технологии формирования разнофункциональных покрытий низкотемпературным, гетерогенным, сверхзвуковым потоком.

Для выполнения указанной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

- критический анализ основных промышленных методов формирования покрытий;
- Описание метода реализации и физических принципов низкотемпературного газодинамического метода
- разработать методику расчёта процесса течения сверхзвуковых двухфазных потоков в газодинамическом тракте установки с учетом межфазного теплообмена;
- разработать физическую и математическую модель взаимодействия высокоскоростной гетерогенной фазы с подложкой с учётом межфазного теплообмена;
- провести анализ реализованных возможностей метода на основании результатов исследований.

Объектом исследования является процесс нанесения разнофункциональных покрытий низкотемпературным, гетерогенным, сверхзвуковым потоком.

Предмет исследования: новая научно обоснованная технология формирования термостойких разнофункциональных покрытий с использованием низкотемпературного газодинамического метода

Методология исследования основана на проведении математического моделирования термогазодинамических и тепло-массообменных процессов с последующим сопоставлением полученных результатов с данными, проведенных автором работы экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в исследовании процессов, сопутствующих формированию покрытий низкотемпературным, гетерогенным, сверхзвуковым потоком и выражается в следующем:

1. Разработана математическая модель термогазодинамических и теплообменных процессов в сверхзвуковом гетерогенном потоке при течении в тракте газодинамического ускорителя с учётом межфазного теплообмена.
2. Разработана физическая модель взаимодействия высокоскоростной гетерогенной фазы с подложкой.
3. Составлен и внедрён в практику эксперимента алгоритм исследований термостойких покрытий в условиях воздействия сверхзвуковых диссоциированных потоков.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В теоретическом плане разработана математическая модель, описывающая с высокой точностью процессы, реализуемые при формировании разнофункциональных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом. Проведена верификация предложенной модели.

Практическая значимость работы обусловлена реализацией на газодинамическом стенде промышленной технологии формировании разнофункциональных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом.

Положения, выносимые на защиту:

- Критический анализ внедрённых в промышленность газодинамических методов формирования защитных покрытий;
- Физические основы низкотемпературного газодинамического метода и его реализация на уникальном оборудовании;
- Математическая модель течения сверхзвукового гетерогенного потока в канале газодинамического ускорителя;

- Физическая и математическая модель взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с твёрдой поверхностью;
- Характеристики термостойких покрытий и их назначение.

Степень достоверности результатов работы подтверждается:

- Результатами экспериментальных исследований на термостойкость, полученных с использованием НТГДМ композиционных покрытий;
- Результатами верификации математических моделей удовлетворительным совпадением результатов, полученных в экспериментальных исследованиях с данными расчётов, при прочих равных начальных условиях;

Апробация работы и публикации.

Основные положения диссертации и результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: «Гагаринские чтения -2020»; «Гагаринские чтения -2021»; 21-я «Авиация и космонавтика» 22-я «Авиация и космонавтика»; 11-я Международная научно-техническая конференция; XI Международная научно-техническая конференция «Искусственный холод в XXI веке».

Результаты диссертационной работы отражены в 8 работах, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, 5 публикаций в сборниках материалов международных научных конференций.

Личный вклад. Автор участвовал в разработке математической модели течения сверхзвукового гетерогенного потока в канале газодинамического ускорителя, принимал участие в разработке физической модели взаимодействия высокоскоростной гетерогенной фазы с подложкой, а также в разработке технологии формирования разнофункциональных термостойких композиционных покрытий и внедрении в практику эксперимента алгоритма исследований термостойких покрытий в условиях воздействия сверхзвуковых диссоциированных потоков.

Структура и объём диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа представлена на 155 страницах основного текста, включающего 42 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, её научная и практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов.

В первой главе проводится критический анализ высокотемпературных газодинамических методов формирования защитных покрытий и технологии их формирования. Такие методы основываются на принципе распыления дисперсных частиц защитного материала в газовой среде, которые при столкновении с поверхностью образуют покрытие.

В работе проанализированы процессы и технологии традиционных газотермических методов:

- газопламенный метод,
- электродуговой метод,
- плазменный метод,
- детонационный метод.

Приведены принципиальные схемы устройств, реализующие эти методы. Рассмотрены преимущества и недостатки присущие каждому из них.

Проведен сравнительный анализ альтернативных методов, указанных выше, с низкотемпературным газодинамическим методом. Характеристики формирования покрытий приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные характеристики формирования покрытий газодинамическими методами

Параметры	Газо- плазменн ый	ЭДМ	Плазменный	Детонационный	НТГДМ
Размер частиц, мкм	10...100	10...100	10...100	10...50	2...40
Температура газа- носителя, °C	от 2000 до 3000	6000	от 5000 до 20000	от 3000 до 5500	до 600
Температура частиц, °C	от 2200	2000	> Тпл	до 1600	Менее 400
Скорость газа- носителя, м/с	от 150 до 200	от 50 до 150	от 1000 до 1500	от 2000 до 3000	до 1500

Скорость частиц, м/с	15...100	от 50 до 150	от 50 до 200	от 500 до 1000	до 1300
Состав газа-носителя	ацетилен, пропан	воздух	аргон, азот, аммиак	ацетилен+O ₂ , пропан+O ₂	азот, воздух, CO ₂
Адгезия на нормальный отрыв, МПа	5...25	5...25	10...50	до 160	до 250
Когезия на нормальный отрыв, МПа	до 40	до 40	до 60	до 60	более 100
Пористость покрытия, %	5...25	---	2...15	0,5...1,5	До 1,5
Производительность метода, кг/ч	5...10	до 50	3...20	1...10	10...500
Толщина покрытия, мм	до 2	до 20	0,01...2	0,05...1,5	0,01...20
Расход газа-носителя, м ³ /ч	0,5...3	50...15 0	3...4	0,2...6	0,1...5000

Показано, что несмотря на свою простоту и мобильность, альтернативные газодинамические методы имеют ряд существенных недостатков. Основная проблема связана с использованием высокотемпературной газовой струи, которая при применении дешевых технических газов (таких как воздух, азот, CO₂) проявляет высокую химическую агрессивность. Это оказывает необратимое отрицательное воздействие на исходные компоненты создаваемого покрытия, что в конечном итоге снижает его качество. Показаны основные достоинства низкотемпературного газодинамического метода, выражющиеся в:

- высокая скорость нанесения покрытий по толщине: например, покрытие из медного порошка на неподвижную подложку наносится со скоростью до 30 мм/с.
- высокая скорость нанесения покрытия по площади: формирование покрытия толщиной 100 мкм на площади 1 м² занимает не более 20 секунд и определяется скоростью перемещения подложки относительно гетерогенного потока.
- широкий диапазон изменения толщины покрытий: от нескольких микрон до нескольких десятков миллиметров;
- высокая мобильность метода: он может быть применен как в стационарном варианте для заводских технологических линий, так и в переносном варианте для нанесения покрытий в полевых и других условиях;

- возможность реализации НТГДМ-технологии в виде одной операции (нанесение однородного покрытия в технологической цепочке) или нескольких операций (нанесение одновременно нескольких, многофункциональных покрытий на одной или нескольких деталях изделия);
- низкие затраты электроэнергии при высоком КПД использования: например, для нанесения двухстороннего покрытия из цинка толщиной 50 мкм на стальной кровельный лист площадью 1 м² затраты энергии составляют 2 кВт/ч;
- простота конструкции и надежность оборудования при высоком уровне автоматизации управления процессом;
- универсальность и простота метода, позволяющие формировать широкий спектр многофункциональных покрытий с заданными свойствами;
- возможность нанесения покрытий на материалы с низкой температурой плавления;
- отсутствие необходимости предварительной подготовки поверхности деталей (например, термического отпуска, пескоструйной обработки, обезжиривания и др.).

Глава 2 посвящена описанию физических основ низкотемпературного газодинамического метода и его реализации на уникальном оборудовании.

Суть НТГДМ заключается в создании покрытий путем столкновения высокоскоростных (сверхзвуковых, $M>1$) гетерогенных потоков с твердой поверхностью. При таком столкновении значительная часть кинетической энергии частиц превращается в тепло, что приводит к резкому повышению температуры и давления в зоне контакта. Гетерогенный поток формируется таким образом, что массовая доля частиц, образующих покрытие, не превышает 10% от массы газа-носителя. Это практически исключает влияние твердой фазы на динамику газа в ускорителе. Таким образом, расчет градиентного течения смеси по длине тракта и в свободном пространстве может быть выполнен с использованием классической теории термогазодинамики.

Низкотемпературный газодинамический метод обеспечивает создание как однокомпонентных, так и состоящих из нескольких компонентов многоцелевых покрытий. Чтобы достичь желаемых характеристик, состав композиционных покрытий формируется из предполагаемого количества химических элементов или их соединений (таких как металлы, оксиды, карбиды, нитриды и прочие), произведенных в форме порошков с размером частиц от 2 до 20 микрометров. Разнообразные порошки, собранные в определенных пропорциях по массе, сначала смешиваются в специализированном газодинамическом смесителе. Затем, полученная смесь, имеющая заданные параметры температуры и давления, подается в

форкамеру, после чего ускоряется в сверхзвуковом сопле до скорости, рассчитанной для конкретного состава смеси. Исходные параметры давления и температуры газа-носителя подбираются таким образом, чтобы скорость частиц при выходе из сопла соответствовала расчётной, а их температура не превышала 10...50% от температуры плавления материала частиц.

Предварительные исследования показывают, что с помощью НТГДМ можно создавать разнообразные композиционные покрытия, точно управлять их свойствами и обеспечивать экологическую чистоту процесса. При этом НТГДМ оказывается более экономичным по сравнению с альтернативными методами и позволяет реализовать быстрые технологии без значительных затрат энергии. Например, для создания 1 мм слоя интерметаллида NiAl на пятне диаметром 10 мм требуется всего несколько десятых долей секунды, в то время как традиционные термические методы формируют 60 мкм переходную зону интерметаллида NiAl за 9 часов при температуре 970 К.

Реализация НТГДМ-технологии представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

Сжатый воздух от компрессорной станции закачивается в баллон 8. По пневматическим магистралям, оснащенным запорными вентилями и пневморегуляторами, далее поступает в системы управления расходом газа 3 и 3', смонтированные на общем пульте газодинамической установки. Часть сжатого воздуха поступает в подсистему дозирования порошка 3, в которой создается газопорошковая взвесь с необходимым массовым расходом порошка и далее транспортируется в камеру смешения 2. Основная часть сжатого воздуха с параметрами, заданными регулятором 3', подается в омический нагреватель газа 4 для нагрева до расчетной температуры. Нагретый газ поступает в камеру смешения 2 и в дальнейшем исполняет роль газа-носителя порошка.

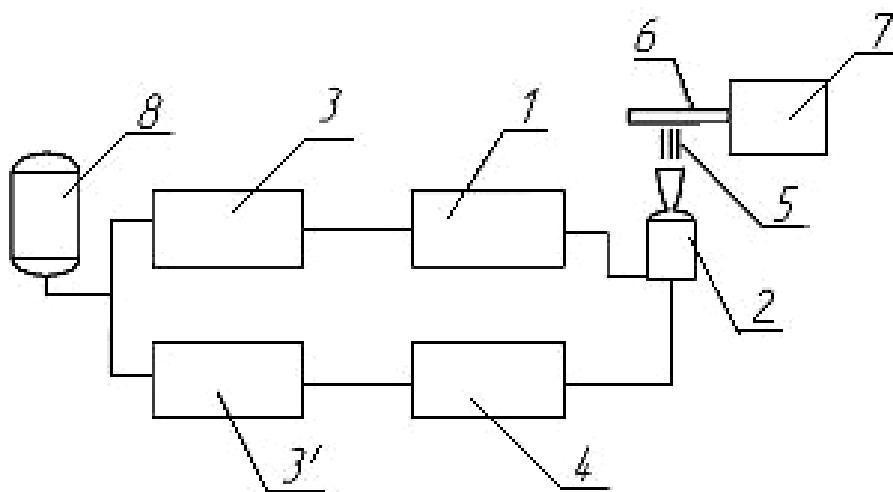


Рисунок 1 - Блок-схема установки реализации НТГДМ-технологии

Далее гетерогенная смесь поступает в разгонный сопловой блок (ускоритель), формирующий сверхзвуковую гетерогенную струю 5. Струя направляется на обрабатываемую деталь (подложку) 6, закрепленную в устройстве механизма перемещения 7, обеспечивающего ее необходимое вращательное и возвратно - поступательное движение

Режим нанесения покрытий для данной пары «порошок – подложка» определяется скоростью частиц порошка в момент их соударения с основой и скоростью движения основы. Скорость частиц порошка зависит от температуры и давления газа-носителя в камере смешения. Совокупность значений всех указанных параметров определяет технологический режим нанесения покрытий.

На базе разработанной блок-схемы НТГДМ-технологии, в лаборатории МАИ создан комплекс уникальных стендов который позволяет не только изучать основы данной технологии, но и разрабатывать на их основе промышленное оборудование. Эти стены включают в себя газодинамический стенд для нанесения покрытий с автоматизированной системой управления и контроля, а также систему для диагностики параметров:

- применение лазерной доплеровской анемометрии для диагностики гетерогенных потоков;
- определение плотности конвективного теплового потока;
- определение температуры поверхности покрытия в процессе нагрева;
- определение интегральной степени черноты покрытия.

Схема такого научного комплекса представлена на рисунке 2.

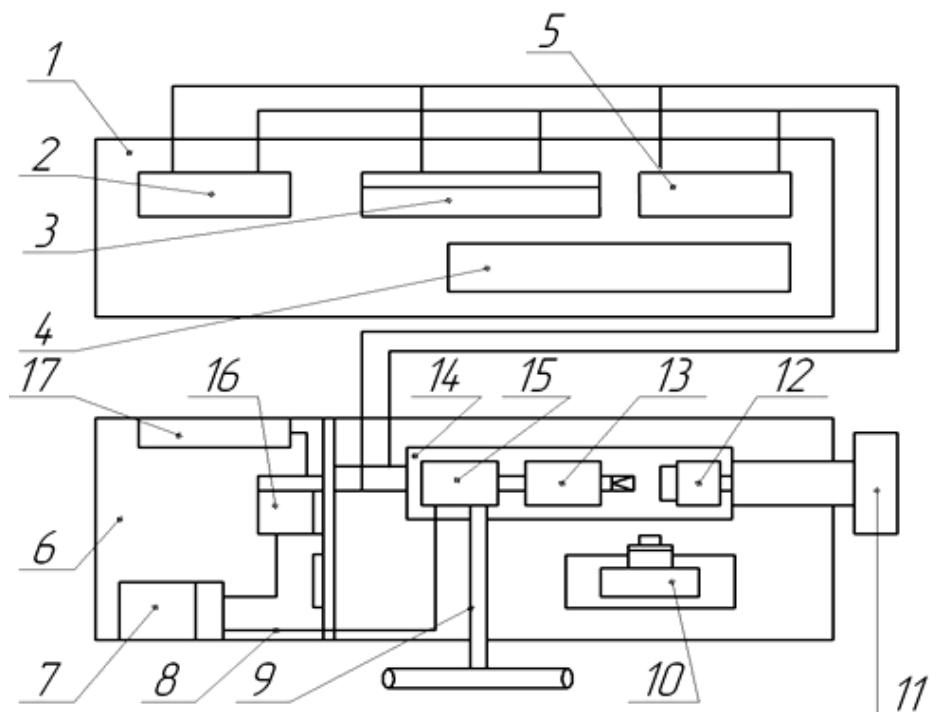


Рисунок 2 - Блок-схема стенда

В боксе 1 размещены приборные стойки 2, которые обеспечивают гибкость в размещении измерительной и вычислительной техники. Это позволяет оптимизировать обслуживание оборудования и повышает эффективность работы. Центральная стойка 3 оснащена монтажным столом для сменного оборудования, используемого для экспресс-анализа и подготовки порошковых смесей.

Стойки 4 и 5 предназначены для диагностического оборудования, которое анализирует теплофизические свойства материалов и покрытий, создаваемых в процессе НТГДМ. Среди этого оборудования — устройства ультразвуковой и вихревоковой интроскопии, которые измеряют толщину покрытий и исследуют их структуру и пористость. Эти системы, управляемые компьютерами класса РС АТ и оснащенные специализированным программным обеспечением, повышают информативность исследований и способствуют оптимизации процесса нанесения покрытий.

Оборудование бокса 1 связано кабельной и оптико-волоконной сетью с системами второго бокса 6, где установлены компоненты газодинамической тракта стенда: система дозирования порошка, регулирование массового расхода и нагрева газа-носителя 15, узел получения газопорошковой смеси, разгонный сопловой блок 13 и робот для манипуляции обрабатываемой детали 12. Для удаления оставшегося порошка предусмотрена установка для очистки газа и спора порошка с циклонным узлом 11.

Подача газа (воздуха) обеспечивается пневмосистемой от стандартной пневмомагистрали высокого давления 9.

Контроль и регулирование электропитания стенда и массового расхода газа осуществляется на пульте 16. Пульт оснащён приборами визуального контроля и системами дистанционного управления позволяющие работать как в ручном, так и автоматическом режимах для обеспечения необходимого технологического процесса.

В третьей главе описывается:

- Разработанная математическая модель течения неизотермической гетерогенной смеси при наличии межфазного теплообмена и алгоритм её расчёта,
- Расчёт газодинамического ускорителя гетерогенного потока с большим удлинением.
- Математическая модель сверхзвукового гетерогенного потока при натекании на плоскую преграду.

В первом приближении при разработке математической модели принималось, что течение газовой фазы в ускорителе одномерное, невязкое, изоэнтропическое, также

предполагается, что полидисперсность частиц порошка может варьироваться в пределах 2...20 мкм, причем концентрация газовой фазы составляет около 90 %. Для такого течения размеры ускорителя и распределение скорости по его длине описываются уравнениями термо - и газодинамики для идеального газа в виде:

- уравнение неразрывности газового потока для критического сечения площадью F_{kp} :

$$m_{\text{газ}} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} F_{kp} \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad (1)$$

- уравнение корреляции площади сечений сопла $F(x)$ и скорости потока $M(x)$ по оси x сопла:

$$\frac{F(x)}{F_{kp}} = \frac{1}{M(x)} \left\{ \left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} [M(x)]^2 \right) \right\}^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (2)$$

При расчете одномерного течения гетерогенной смеси в ускорителе с учетом вязкости газа-носителя использовалась математическая модель, составленная на базе уравнений Навье–Стокса. Уравнение для одномерного стационарного течения каждой из фаз при следующих допущениях:

- фазы гетерогенной смеси локально однородные;
- межфазовые превращения отсутствуют;
- взаимодействие между частицами отсутствует;
- отсутствует дробление частиц или их коагуляция;
- на частицу действует только сила аэродинамического сопротивления газовой фазы.

В такой постановке уравнения сохранения для течения каждой i -ой фазы с массовой концентрацией c_i могут быть представлены в виде:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(c_i \cdot \rho_i \cdot u_i)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

- уравнение движения:

$$c_i \rho_i u_i \frac{du_i}{dx} = - \frac{d(c_i p)}{dx} + R_{i \text{ аэр.}} \quad (4)$$

где для газовой фазы $u_i = u(x)$, а для твердой фазы $u_i = V_p(x)$, $R_{i,\text{аэр}}$ - сила аэродинамического сопротивления межфазного взаимодействия, описывается соотношением вида:

$$R_{i,\text{аэр}} = C_{\text{аэр}} \frac{\rho_i(x)_{\text{газ}} [u(x) - V_p(x)]^2}{2} \cdot f_{\text{мид}} \cdot n \quad (5)$$

где $\rho_i(x)_{\text{газ}}$ - изменение плотности газа по длине ускорителя; $f_{\text{мид}}$ - площадь миделева сечения частицы; n - число частиц в единице объема:

$$n = \frac{6c_i}{d_p^3}$$

где d_p - диаметр частицы; $u(x)$ - изменение скорости газовой фазы вдоль сопла; $V_p(x)$ - изменение скорости твердой фазы вдоль сопла; $C_{\text{аэр}}$ - коэффициент аэродинамического сопротивления сферы субмикронного диапазона, рассчитывается по соотношениям, предложенным в работе [94]:

$$c_i \cdot \rho_i \cdot u_i \frac{d}{dx} \left(\frac{u_i^2}{2} \right) = - \frac{\partial (c_i \cdot p \cdot u_i)}{\partial x} + Q_{i \text{ кон.}} \quad (6)$$

где для газовой фазы $u_i = u_{\text{газ}}$, а для твердой фазы $u_i = V_p$. $Q_{i \text{ кон.}}$ – тепловой поток межфазного конвективного теплообмена в единице объема гетерогенной смеси, т.е. $Q_{i \text{ кон.}} = Q_{\text{кон.}}$ – представляется уравнением конвективного теплообмена Ньютона в виде:

$$Q_{\text{кон.}} = \alpha(x) [T(x)_{\text{газ}} - T(x)_p] \cdot f_p \cdot n \quad (7)$$

где $\alpha(x)$ - изменение среднего коэффициента теплоотдачи между газовой и твердой фазами вдоль сопла, $T(x)_{\text{газ}}$ и $T(x)_p$ - изменение температуры газа и частицы вдоль сопла, соответственно, f_p - площадь боковой поверхности частицы $f_p = \pi d_p^2$.

Предлагаемый упрощенный алгоритм расчета течения базируется на использовании интегральных соотношений второго закона механики Ньютона. В самой простой постановке задачи, эти соотношения правомерно использовать в том случае, когда сила, действующая на тело массой m , будет оставаться постоянной в течение всего времени воздействия.

В анализируемом нами случае телом является частица, масса которой m_p . Сила, действующая на частицу, по своей природе является аэродинамической силой $R_{\text{аэр}}$, которая возникает в результате взаимодействия частицы с высокоскоростным потоком газа-носителя.

Как отмечалось выше, в газодинамическом ускорителе стенда реализуется градиентное течение, поэтому аэродинамическая сила $R_{\text{аэр}}$ (5) не будет оставаться постоянной. Поэтому для выполнения, указанного выше условия всю длину газодинамического тракта

стенда следует разбить на n_i элементарных участков длиной L_i , на каждом из которых аэродинамическая сила $R_{\text{аэр},i}$ будет считаться постоянной величиной.

На этой концепции построена разработка упрощенного алгоритма расчета газодинамической задачи течения гетерогенной смеси в ускорителе. Конечным результатом расчета с использованием данного алгоритма должно являться изменение скорости газовой фазы $u_{\text{газ}}(x)$ и скорости частиц $V_p(x)$ на длине каждого из n_i элементов конструкции газодинамического тракта стенда.

На рисунке 3, 4 приведены результаты расчета газовой динамики и межфазного теплообмена для частиц из меди и алюминия соответственно по упрощенной математической модели.

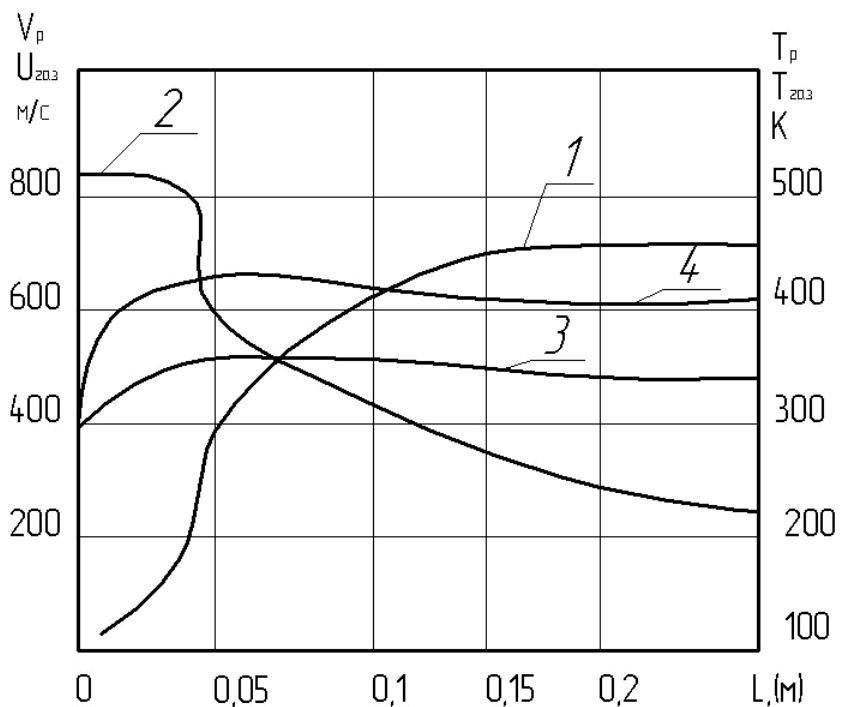


Рисунок 3 - Изменение скорости и температуры газовой ($u_{\text{газ}}$, $T_{\text{газ}}$) и твердой фаз (V_p , T_p) по длине ускорителя: 1 – скорость газовой фазы,
2 – температура газовой фазы, 3 – температура частицы из Cu $d=20$ мкм,
4 – температура частицы из Cu $d=40$ мкм

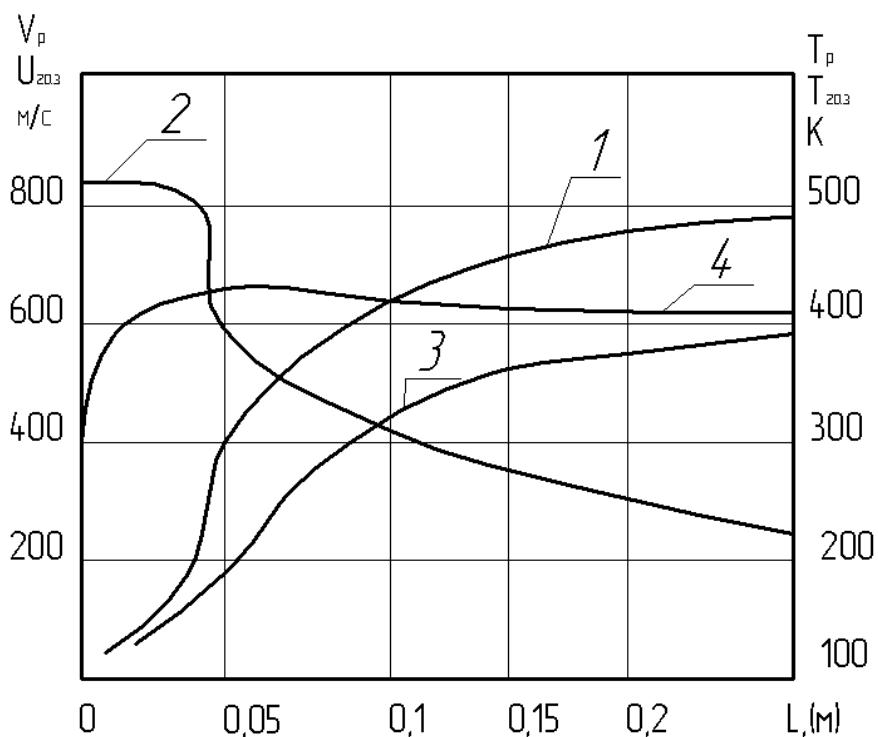


Рисунок 4 - Сравнение данных расчета изменения скорости газа и температуры Тгаз газового потока, а также скорости V_p и температуры T_p частицы из Al $dp = 40$ мкм по длине ускорителя: 1 – скорость газовой фазы - общая математическая модель, 2 – температура газовой фазы, 3 – скорость частицы из Al - общая математическая модель, 4 - температура частицы из Al - общая математическая модель

Из анализа приведенных данных следует, что на уровень температуры частиц род материала оказывает влияние в меньшей степени, чем размер частиц.

Для достижения высокого качества покрытий, формируемых высокоскоростными потоками ускорители должны иметь не только расчётный профиль, но и достаточную длину для достижения необходимой скорости частиц. Одной из ключевых особенностей течений вязких газов в удлинённых соплах является образование пограничного слоя на стенках канала, который значительно уменьшает фактическое проходное сечение сопла по сравнению с расчётным, технологическим сечением. Это приводит к снижению массового секундного расхода потока, следовательно, и его скорости. Если при проектировании таких каналов не учитывать этот эффект, пограничный слой может смыкаться внутри сопла, что приводит к возникновению установившегося турбулентного течения, аналогичного тому, которое происходит на основном участке гладкой цилиндрической трубы. Установлено, что влияние нарастания пограничного слоя приводит к уменьшению скорости газа-носителя примерно на 16%, а скорости частиц — до 10%.

Представлена приближенная математическая модель расчёта течения при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду, и проанализированы режимы

инерционного движения частиц в жатом слое. Отмечено, что режим течения газовой и твердой фазы вблизи поверхности зависит от двух безразмерных комплексов для газа-носителя и частиц, $K_{газ}$ и K_p , соответственно, где:

$$K_{газ} = \frac{u_{газ}}{\varphi_{V,p} h} \text{ и } K_p = \frac{V_p}{\varphi_{V,p} h}.$$

В четвертой главе проведен детальный анализ механизма взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с поверхностью. Установлено, что интервал скоростей частиц, при котором реализуется формирование покрытия на поверхности, ограничен двумя предельными скоростями:

- первая критическая скорость — это предельная скорость частицы, при которой происходит упругий удар.;
- вторая критическая скорость — это скорость частицы, при которой твердая поверхность начинает механически разрушаться в результате бомбардировки её частицами, что приводит к процессу эрозии подложки.

Эти критические скорости определяют диапазон, в котором возможно эффективное и качественное формирование покрытий.

Предложена математическая модель оценки первой и второй критических скоростей.

Проведен анализ кинетики взаимодействия частиц с подложкой. Показано что при скорости частиц до 700 м/с, реализуется наиболее простая, линейная зависимость прочности покрытия от скорости частиц. При увеличении скорости частиц их кинетическая энергия становится столь значительной, что механизм контактного взаимодействия частицы с подложкой сильно изменяется, в частности значительно увеличивается уровень напорного динамического давления, которое играет важнейшую роль в активировании процесса химического взаимодействия материалов частицы и подложки

Рассмотрена динамика удара твердой частицы о поверхность. Отмечено, что ударное действие динамического давления приводит к дроблению отдельных частиц, а также снижению энергии активации на величину, пропорциональную уровню давления. Отмеченный комплекс факторов обеспечивает прочное соединение как частиц с подложкой (адгезия), так и частиц между собой в объеме покрытия (когезия). Также установлено что уровни динамических давлений при соударении столь высоки, что в процессе удара осуществляется деформационное упрочнение материала частицы, которое оказалось термически стабильным и сохраняется после их продолжительного отжига при температурах, превышающих температуру рекристаллизации материалов покрытий.

Приведено в раскрытой форме уравнение баланса энергии в зоне удара частицы с подложкой.

$$E_{\text{кин.} p} = E_{\text{деф.} p} + E_{\text{деф. под}} + E_{\text{наг.} p} + E_{\text{наг. под}}$$

Дано физическое и математическое описание всех его составляющих:

В пятой главе изложены и проанализированы характеристики ряда защитных композиционных покрытий, полученных с применением НТГДМ – технологии. Проведён анализ влияния сформированных на лабораторном стенде покрытий на механических свойства материалов.

Методика исследования заключалась в следующем. С использованием НТГДМ – технологии наносились жаропрочные и термостойкие покрытия простые и композиционные (металлокерамические) на стандартные образцы с целью проведения испытаний по исследованию механических и трибологических свойств (рисунок 5).

Толщины покрытий, например, из жаропрочного карбида ниобия (NbC) на стандартных образцах их меди М1 изменялись в пределах 40...50 мкм. Толщины композиционных, металлокерамических покрытий, примерно, такого же уровня.

Изменение температуры образцов в процессе механических испытаний, варьировалось в диапазоне от 20К (температура жидкого водорода) до 700К. Это достигалось путем помещения испытуемых образцов в крио- и термостаты. В этих же условиях прикладывалась механическая нагрузка на образцы.

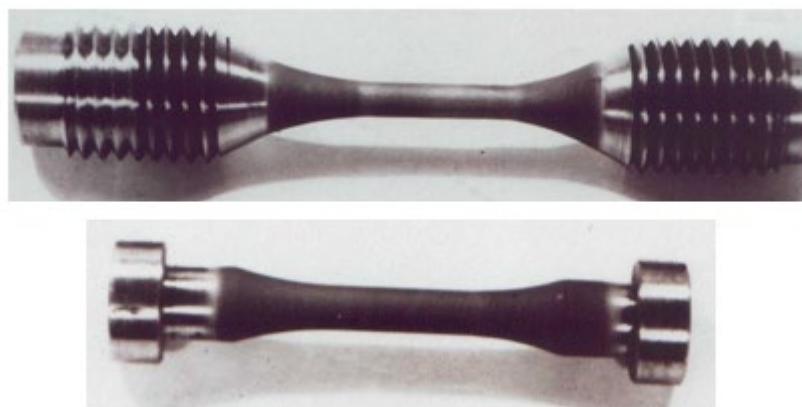


Рисунок 5 - Фотографии медных образцов с покрытием из карбида ниобия NbC для испытаний механических свойств

Цель указанных исследований заключалась в том, чтобы выявить влияние разных по композиции покрытий на основные механические характеристики образцов.

Испытания показали, что предел прочности σ_v при температуре 20К у образцов с покрытиями увеличивается на 15...20%. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ в 2.58 раза, модуль упругости Е на 57%. При температуре 300К те же характеристики увеличиваются на 52%, в 3.69 раза и на 57%, соответственно. Характеристики пластичности при этом понижаются, но остаются на достаточно высоком уровне. Механические характеристики образцов с покрытием из карбida ниобия (NbC) и без приведены на гистограмме рисунок 6.

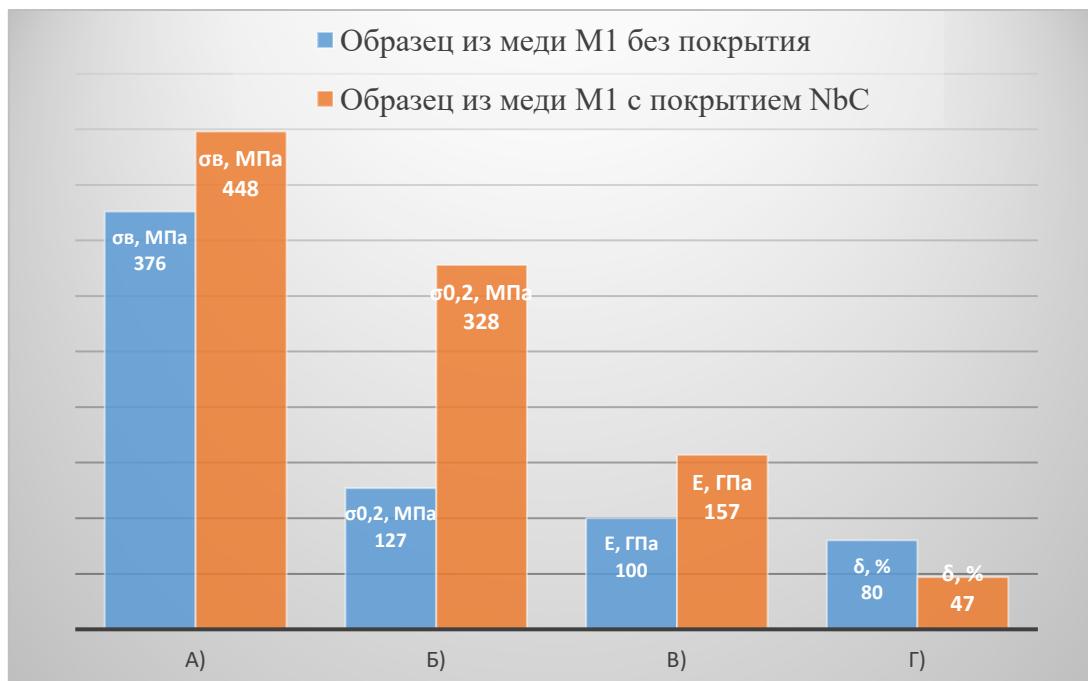


Рисунок 6 - Диаграмма механических свойств образцов с покрытием и без покрытия: А) – предел прочности, МПа; Б) – предел текучести, МПа; В) – модуль упругости, ГПа; Г) – относительное удлинение, %

Рассмотрены проведённые испытания на жаропрочность и термостойкость нескольких типов композиционных покрытий при воздействии на них высокотемпературного кислородо – водородного потока. Указанные характеристики исследовались с применением двух типов образцов с покрытиями – неохлаждаемые (при испытании на жаропрочность, рисунок 6 и 7) и охлаждаемые (при испытании покрытий на термостойкость, рисунок 10 и рисунок 11).

Испытания покрытий проводились в условиях, адекватных термохимическим параметрам, реализуемым в камере сгорания кислородо-водородного жидкостного ракетного двигателя или других элементах изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Дозвуковой высокотемпературный ($\sim 10000\text{K}$) диссоциированный кислородо – водородный поток создавался с использованием плазмотрона со стабилизацией мощной электрической дуги вихрем воды.

В области горения дуги молекулы воды, испарившиеся со стенок водяного вихря, диссоциировали на атомы водорода и кислорода, образуя высокотемпературный кислородо-водородный поток.

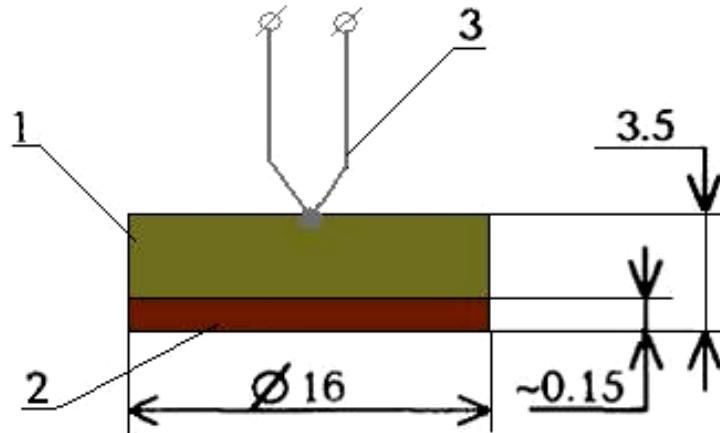


Рисунок 7 - Схема образца для испытания для жаропрочности покрытия: 1 - стенка из ниобия; 2 - композиционное покрытие; 3 - платина - платинородиевая термопара

Методика испытаний сводилась к следующему. На первом этапе исследования с целью определения удельного теплового потока q_w к стенке неразрушающей модели предварительно проводилось калориметрирование кислородо - водородного потока на выбранном режиме работы плазмотрона (постоянная мощность). Схема модели для испытаний приведена на рисунке 7. Результаты испытаний неохлаждаемых образцов из ниобия с двумя типами термостойких покрытий приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты испытаний неохлаждаемых образцов из ниобия с двумя типами термостойких покрытий.

№ образца	q_w	$T_{з.ст.}$	Время испытания	Композиционный состав покрытия
-----	kBt/m^2	K	сек	-----
5	300	1420	22	MoSi_2 – подслой. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr} + \text{Si}$ - покрытие
7	1000	1450	14,0	$\text{NbC} + \text{NiAl} + \text{Cr} + \text{Si}$

	1250	1600	12,0	
	1500	1700	10,8	
	1800	1820	7,8	
8				MoSi ₂ – подслой. Al ₂ O ₃ +MgO Al ₂ O ₃ + Cr+Si - покрытие
	1500	1870	11,4	
	1880	2000	6,0	

После проведения испытаний неохлаждаемых образцов (№ 5,7,8, таблица 2) не обнаружено нарушений сплошности покрытия, его расплава, уноса массы и других дефектов.

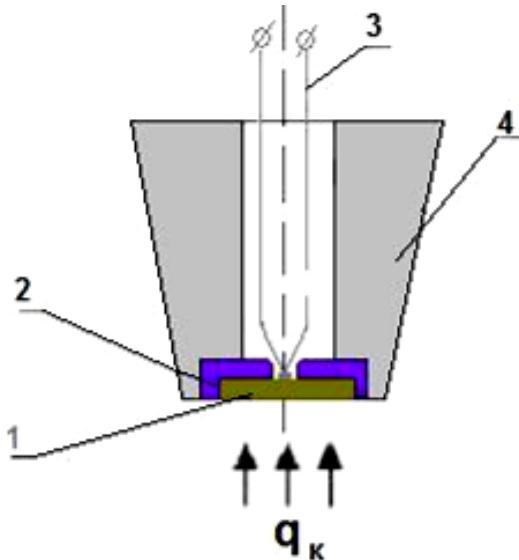


Рисунок 8 - Схема модели для испытания на жаропрочность покрытий: 1 – образец из ниобия с покрытием; 2 – втулка из карбида бора (ВС); 3 - платина — платинородиевая термопара; 4 – обтекатель из графита; q_w – конвективный тепловой поток

На втором этапе исследований проводилось испытание неохлаждаемых образцов с покрытиями с целью определения их термостойкости. Образцы из ниобия с разными композиционными покрытиями, защищенные графитовой оправкой (рисунок 8), вводились в высокотемпературный кислородо - водородный поток и перемещались вверх по потоку (в более высокотемпературную зону набегающего потока) до тех пор, пока не наступало разрушение термостойкого покрытия. В ходе исследований по методике, изложенной в главе 2, определялась температура разрушения композиционных покрытий на подложке из ниобия в кислородо - водородном потоке. Момент разрушения определялся с использованием рапидной видеозаписи при непрерывном хронометрировании процесса.

Результаты исследований неохлаждаемых образцов (№ 1, 2, 3, 4) приведены на рисунке 9 и рисунке 10. Как и предполагалось, наиболее термостойкими оказались композиции покрытий на образцах №3 и №4.

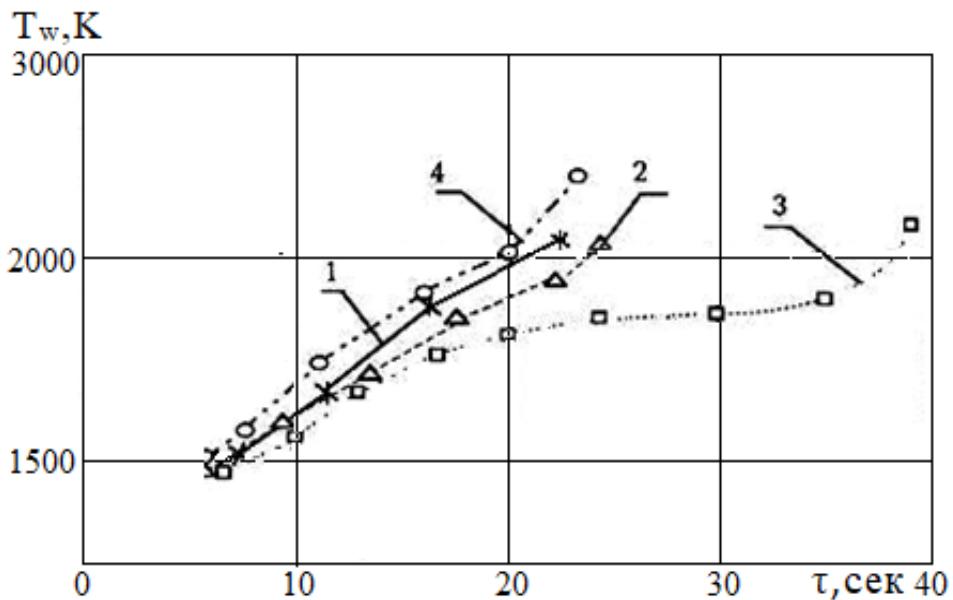


Рисунок 9 - Изменение температуры передней поверхности T_w покрытий за время экспозиции тепловым потоком плотностью $q_w = 2500 \text{ кВт/м}^2$:

- 1 – композиционное покрытие NbC + NiAl + Si (1),
- 2 - композиционное покрытие NbC + NiAl + Si(2),
- 3 - композиционное покрытие NbC + NiAl + плакировка Si,
- 4 – композиционное покрытие Al₂O₃+MgO Al₂O₃+Cr+Si

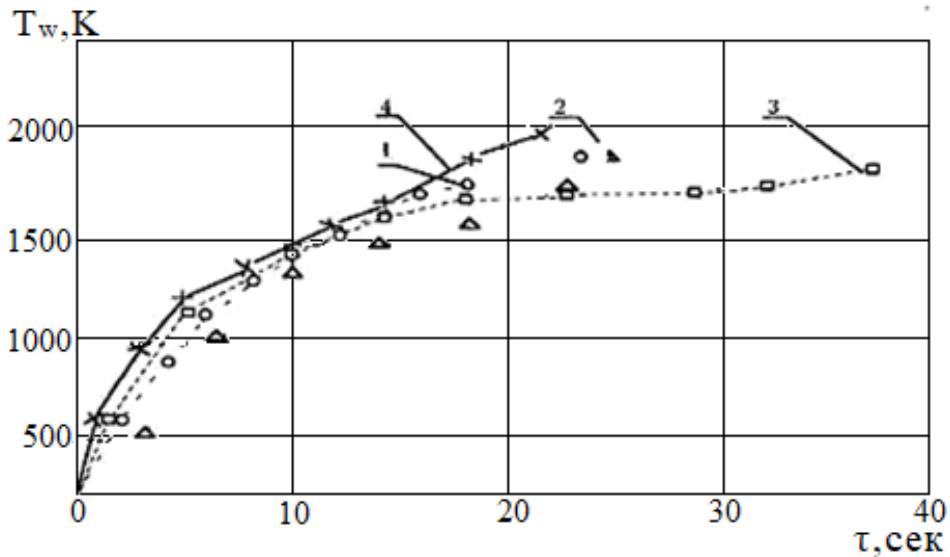


Рисунок 10 - Изменение температуры задней поверхности покрытий $T_{z.\text{ст.}}$ за время экспозиции тепловым потоком плотностью $q_w = 2500 \text{ кВт/м}^2$:

- 1 – композиционное покрытие NbC + NiAl + Si (1), 2 - композиционное покрытие NbC + NiAl + Si(2), 3 - композиционное покрытие NbC + NiAl + плакировка Si, 4 - композиционное покрытие Al₂O₃+MgO Al₂O₃+Cr+Si

Вторая серия испытаний проводилась на термостойкость с использованием охлаждаемых моделей. Образцы для моделей выполнялись из меди. На их рабочую поверхность наносились термостойкие покрытия из разных композиционных металлокерамик (керметы). Охлаждаемая часть модели изготавлялась из медной трубы диаметром $d = 14$ мм. Средняя часть трубы профилировалась в виде прямоугольного участка площадью $S = (20 \times 10)$ мм^2 . На эту площадку наносилось композиционное покрытие. Схема такой модели приведена на рисунке 11.

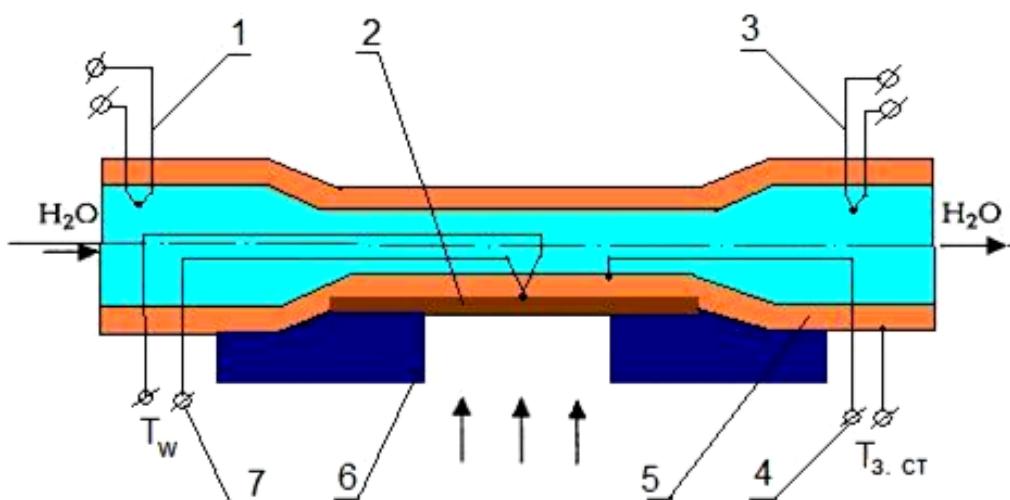


Рисунок 11 - Охлаждаемая модель для исследования жаропрочности покрытий в высокотемпературном кислородо-водородном потоке.

1,3 - хромель-копелевые термопары для измерения температуры воды; 2 – покрытие; 4 - медь - константановая термопара для измерения температуры покрытия; 5 – медная стенка; 6 – защита из карбида бора (ВС); 7 - хромель - алюмелевая термопара

Для определения температуры передней T_w и задней стенки $T_{3,ст}$ рабочей поверхности образца в пластину зачеканивались термопары. На переднюю поверхность с покрытием устанавливалась хромель-алюмелевая термопара с диаметром королька (спая) $d = 0.4$ мм. Перед зачеканкой термопары на внешнюю поверхность образца наносилось композиционное покрытие. Затем в медной стенке с покрытием изготавливалось отверстие для королька термопары. Оно развалицовывалось, устанавливалась термопара, после чего королек термопары зачеканивался в разваликованном отверстии. При этом тепловоспринимающая поверхность королька термопары делалась плоской (рисунок 12, позиция 2).

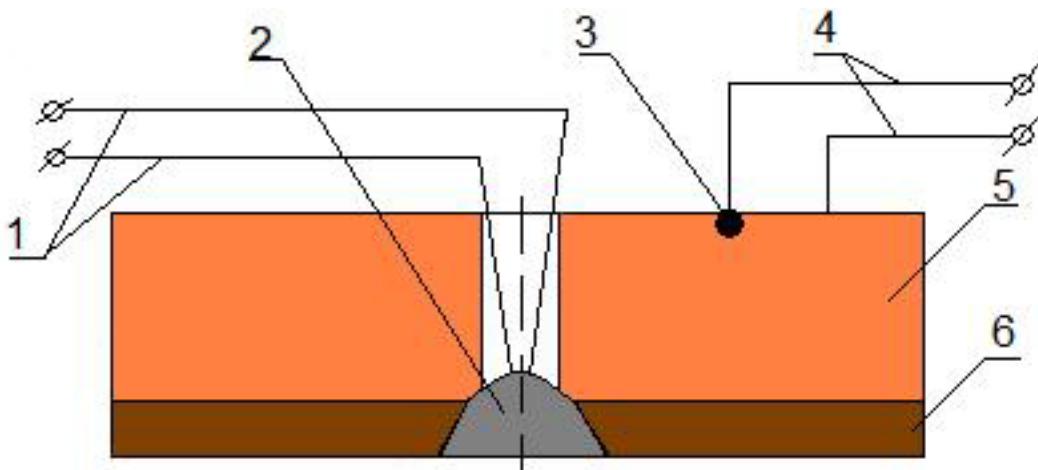


Рисунок 12 - Схема заделки термопар в исследуемый образец.

1 - хромель-алюмелевая термопара; 2 – королек термопары; 3 – королек из константана; 4 – медь- константановая термопара; 5 - медная стенка;
6 – покрытие.

На заднюю, омываемую водой поверхность устанавливались медь – константановая термопара, с диаметром королька $d = 0.3$ мм. Вторым проводником для константановой термопары является медный корпус охлаждаемой модели, рисунок 12.

Для составления теплового баланса воды, на входе и на выходе охлаждаемой модели помещались две хромель-копелевые термопары, которые измеряли на стационарном режиме температуру нагрева воды во время проведения огневых испытаний.

Для фиксации площади воздействия высокотемпературного кислородо - водородного потока на образец, на его поверхность были наложены две тонкие пластины, изготовленные из карбонитрида бора (BCN).

Таким образом, площадь воздействия кислородо - водородного потока на образец составляла $F = (20 \times 10) \text{ mm}^2$.

Во время проведения испытаний регистрировался расход воды, т г/сек через охлаждаемую модель.

Результаты огневых испытаний, охлаждаемых образцов с термостойкими покрытиями в диссоциированном кислородо - водородном потоке при разных уровнях удельного теплового потока q_w приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты огневых испытаний, охлаждаемых образцов с разными покрытиями в диссоциированном кислородо - водородном потоке.

Род покрытия	$q_w \times 10^{-3}$	G_{H_2O}	T_w	$T_{з.ст.}$	ΔT_{H_2O}
-----	кВт/м ²	г/сек	К	К	град
NbC	30	50	-----	560	80
NiAl+NbC+Si (NiAl – интерметаллид)	25	57	-----	455	50
NiAl+NbC+Si (NiAl плакирован Si)	1,88 12,0 25	58,8 58,8 90	447 580 560	424 456 510	15,0 48,0 56,0

Визуальное обследование охлаждаемых моделей после огневых испытаний в течение 1-ой минуты показало отсутствие каких-нибудь повреждений покрытий. На рабочих поверхностях образцов не нарушалась целостность покрытий, отсутствовали вздутия и каверны. Не обнаружено также расплава, изменений толщины покрытий, обусловленных уносом массы и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

В результате исследований, проведенных в данной диссертационной работе, получены следующие результаты:

1. Проведено критическое сопоставление низкотемпературного газодинамического метода нанесения разнофункциональных покрытий с альтернативными методами. Выявлены потенциальные производственные и технологические возможности метода. Установлены преимущества метода по сравнению с плазменным, газопламенным и другими. Например, показано, что низкая температура двухфазно струи и высокая скорость соударения частиц с подложкой при формировании НТГДМ – покрытий позволяет:

- использовать в качестве газа-носителя обычный воздух, что значительно удешевляет метод;
- исключить в процессе нанесения покрытий химическое взаимодействие частиц с газом-носителем и, в связи с этим, повысить степень дисперсности частиц, что улучшает качество покрытия, его микроструктуру;

- очищать поверхность подложки от окисных и других пленок непосредственно в процессе нанесения покрытия, то есть исключить операции предварительной подготовки поверхности подложки;
- активировать сопряжённые поверхности подложки и частиц, обеспечить прочное физическое и химическое взаимодействие покрытия и подложки за счёт локального давления и значительного повышения температуры в пятне контакта в силу перехода части энергии в тепловую.

2. Проведён анализ физической сущности НТГДМ. На основании результатов анализа составлена принципиальная схема установки лабораторного типа.

3. Представлена методология диагностики сверхзвуковых гетерогенных потоков и исследования механических и теплофизических характеристик разнофункциональных покрытий.

4. Разработаны физическая и математическая модели установившегося гетерогенного потока в газодинамическом тракте. Представлен алгоритм решения задачи. По результатам расчёта установлено что скорость частиц определяется родом материала и размерами частиц, скоростью и плотностью газового потока, а также характером течения газа-носителя в ускорителе.

Рассмотрены особенности течения в микросоплах с большим удлинением. Показано что при проектировании таких каналов необходимо учитывать влияние пограничного слоя на течение гетерогенной смеси. Установлено, что влияние нарастания пограничного слоя приводит к уменьшению скорости газа-носителя примерно на 16%, а скорости частиц — до 10%.

5. Предложены приближенные методы оценки влияния различных параметров на режим взаимодействия гетерогенной струи с подложкой.

6. Проведён анализ механизма взаимодействия высокоскоростной дисперсной фазы с подложкой. Установлено, что интервал скоростей частиц, в котором реализуется формирование покрытия на поверхности ограничен двумя предельными скоростями:

- первая критическая скорость — это предельная скорость частицы, при которой происходит упругий удар.;
- вторая критическая скорость — это скорость частицы, при которой твердая поверхность начинает механически разрушаться в результате бомбардировки её частицами, что приводит к процессу эрозии подложки.

Предложена математическая модель определения критических скоростей.

7. Проведён анализ возможных механизмов взаимодействия частиц с твердой подложкой, отмечено, что ударное действие динамического давления приводит к дроблению

отдельных частиц, а также снижению энергии активации на величину, пропорциональную уровню давления.

8. Рассмотрены характеристики защитных покрытий, полученных с применением НТГДМ. Сравнительно тонкий поверхностный слой покрытия из карбида ниобия (NbC) толщиной ~ 40 мкм заметно влияет на статическую прочность образца из CuAgZr диаметром 5 мм. Например, если при криогенных температурах напряжения разрыва $\sigma_{\text{в}}$ указанного материала с покрытием и без него совпадают, то в области повышенных температур (700К) $\sigma_{\text{в}}$ материала с покрытием возрастает до 20%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Григоровский В.В., Зубко А.А., Никитин П.В., Сучкова Е.В. Повышение теплозащитных характеристик углерод-углеродных композитов методом нанесения покрытия низкотемпературным сверхзвуковым гетерогенным потоком// Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 570–576
2. Григоровский В.В., Котович И.В., Ежов А.Д., Сучкова П.И. Особенности газодинамики и теплообмена на поверхности лопаток турбин ГТД // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 1. С. 600-610
3. Григоровский В.В., Зубко А.А., Никитин П.В. Кожемяко А.С. Математическое моделирование взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с плоской преградой // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 5. С. 198-207.
4. Григоровский В.В., Никитин П.В. Формирование разнофункциональных покрытий низкотемпературными сверхзвуковыми гетерогенными потоками // Сборник тезисов докладов XLVII международной молодёжной конференции «Гагаринские чтения-2021 –М: Издательство «Перо», 2021 -Мб.[электронное издание]
5. Григоровский В.В., Коваленко А.С., Зубко А.А. Газодинамическое исследование выходных устройств для реализации НТГДМ технологии // Сборник тезисов докладов 21-ой международной конференции «Авиация и космонавтика»
6. Григоровский В.В., Коваленко А.С., Зубко А.А., Бусел Н.В. Улучшение теплозащитных свойств углерод-углеродных композитов с использованием низкотемпературных сверхзвуковых гетерогенных потоков // Сборник тезисов докладов 22-ой международной конференции «Авиация и космонавтика»
7. Григоровский В.В., Коваленко А.С., Бусел Н.В. Исследование сеточной сходимости при моделировании процесса охлаждения защитных экранов форсажной

камеры ГТД заградительным способом// Сборник тезисов 22-ой международной конференции «Авиация и космонавтика»

8. Григоровский В.В., Коваленко А.С., Бусел Н.В. Сравнительный анализ применения воздухоохладителей и моноблочных систем для среднетемпературного склада готовой продукции // Сборник тезисов XI международной научно-технической конференции «Искусственный холод в XXI веке» (ранее «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»)