

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МАИ (НИУ)

На правах рукописи



Григоровский Вячеслав Валерьевич

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

Специальность 1.3.14
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., заслуженный деятель науки РФ,
проф. Никитин Петр Васильевич

Москва – 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ	16
1.1 Принципы формирования покрытий.....	16
1.2 Сравнительный анализ газодинамических методов.....	17
1.2.1. Газопламенный метод.....	21
1.2.2. Электродуговой метод.....	24
1.2.3. Плазменный метод.....	27
1.2.4. Детонационный метод.....	33
1.2.5. Низкотемпературный газодинамический метод (НТГДМ).....	37
Выводы по главе 1.....	40
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСА ПРОЦЕССОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА УНИКАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	42
2.1. Физическая сущность низкотемпературного газодинамического метода.	42
2.2. Блок-схема стенда и его описание.....	45
2.3. Диагностика параметров сверхзвуковых гетерогенных потоков и свойств покрытий.....	50
2.3.1. Применение лазерной доплеровской анемометрии для диагностики гетерогенных потоков.....	51
2.3.2. Определение плотности теплового потока.....	53
2.3.3. Определение температуры поверхности покрытия в процессе нагрева.....	60
2.3.4. Определение степени черноты покрытия.....	63
2.3.5. Испытание термостойких покрытий в высокотемпературных потоках.....	65
Выводы по главе 2.....	68

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ.	69
3.1. Математическая модель одномерного течения при наличии межфазного теплообмена.	69
3.2. Алгоритм расчета математической модели одномерного течения при наличии межфазного теплообмена.	72
3.2.1. Расчёт кинематики частицы в газодинамическом ускорителе.	73
3.2.2. Расчет межфазного теплообмена в гетерогенном потоке.	73
3.3. Расчёт газодинамического ускорителя гетерогенного потока с большим удлинением.	77
3.4. Математическая модель сверхзвукового гетерогенного потока при натекании на плоскую преграду.	82
3.4.1. Расчёт течения при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду.	83
3.4.2. Расчёт инерционного движения частиц сверхзвукового гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой.	86
Выводы по главе 3.	94
ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА С ТВЁРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.	96
4.1. Механизм взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с твердой стенкой конструкции.	97
4.2. Кинетика взаимодействия высокоскоростных частиц гетерогенного потока с подложкой.	101
4.2. Динамика удара высокоскоростной твердой частицы о поверхность стенки конструкции.	105
4.3.1. Дробление частиц при ударе.	106
4.4. Анализ энергетического баланса в зоне удара частицы с поверхностью стенки конструкции.	108

4.4.1. Алгоритм расчёта энергии частицы	108
4.4.2. Энергия деформации частицы.	108
4.4.3. Оценка энергии деформации частицы в процессе удара	111
4.4.4. Расчет энергии нагрева частицы и подложки.	113
4.4.5. Расчёт времени взаимодействия частицы с подложкой.....	117
4.4.6. Итоговое уравнение баланса энергии.	119
Выводы по главе 4.....	120
ГЛАВА 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ.	122
5.1. Воздействие процесса формирования термостойких покрытий на механические свойства поверхностного слоя материалов конструкции изделия.	122
5.2. Характеристики ряда термостойких покрытий в условиях воздействия кислородо – водородного высокотемпературного потока.....	128
Выводы по главе 5.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	141

ВВЕДЕНИЕ

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, тантал и ниобий, требуют обязательного нанесения защитных покрытий. Несмотря на то, что эти материалы обладают высокой жаропрочностью, они имеют низкую термостойкость и окисляются при температурах выше 1000 К.

Использование антикоррозионных и износостойких покрытий может существенно снизить материальные, энергетические и трудовые затраты на эксплуатацию машин и механизмов, уменьшить простой оборудования, увеличить выпуск продукции, повысить её качество и срок службы, а также снизить расход легирующих сталей и сплавов. 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:

- защитным барьером от проникновения химически активных компонентов высокотемпературного набегающего потока воздуха (O_2 , O, N) к поверхности тепловой защиты ВЛА;
- 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 МАИ 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;
- электроизоляционные покрытия и другие.

Дальнейшая разработка и совершенствование НТГДМ технологии 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.

Чтобы достичь поставленной цели в рамках настоящего исследования, были определены, а также решены задачи, представленные ниже:

- провести углубленный анализ базовых, самых распространенных на сегодняшний день промышленных методов, согласно которым протекает процесс формирования покрытий;
- описать метод, на основании которого реализуется процесс нанесения покрытий низкотемпературным газодинамическим сверхзвуковым потоком;
- разработать методику расчета течения сверхзвуковых двухфазных потоков в газодинамическом тракте установки, принимая во внимание межфазный тепловой обмен;
- разработать физическую, а также математическую модель взаимодействия высокоскоростной гетерогенной фазы с подложкой, принимая во внимание межфазный тепловой обмен;
- Рассмотреть возможности метода на базе полученных данных в исследованиях.

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 последующем 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

азработана математическая модель термогазодинамических и теплообменных процессов в сверхзвуковом гетерогенном потоке при течении в тракте газодинамического ускорителя с учётом межфазного теплообмена.

азработана физическая модель, на основании которой протекает взаимодействия гетерогенной высокоскоростной фазы с подложкой.

формирован, и применён на практике экспериментальный алгоритм исследований термически устойчивых покрытий в условиях влияния диссоциированных сверхзвуковых 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 формирования разнофункциональных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом.

Положения, выносимые на защиту:

- Проведение критического анализа интегрированных в промышленную практику газодинамических методов образования защитных покрытий;
- Физические основы низкотемпературного газодинамического метода, практическая реализация на современном оборудовании уникального образца;

- Математическая модель течения гетерогенного сверхзвукового потока в канале газодинамического ускорителя;
- Математическая, а также физическая модель, на основании которых происходит взаимодействие гетерогенного сверхзвукового потока с твердым основанием;
- Описание термически устойчивых покрытий, и их практическое назначение.

Достоверность результатов, которые были получены в конце исследования, подтверждается:

- Достижениями в ходе проведения экспериментов на термостойкость композиционных покрытий, полученных с применением НТГДМ;
- Итогами верификации математических моделей, совпадением результатов по итогам экспериментов с расчетами.

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях:

- «Гагринские чтения -2020, 2021»; 21-я, 22-я «Авиация и космонавтика»;
- 11-я Международная научно-техническая конференция «Искусственный холод в XXI веке»

Публикации по теме диссертации.

Результаты работы отражены в 3 статьях:

- Григоровский В.В., Зубко А.А., Никитин П.В., Сучкова П.И. Повышение теплозащитных характеристик углерод-углеродных композитов методом нанесения покрытия низкотемпературным сверхзвуковым гетерогенным потоком // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 570–576.
- Григоровский В.В., Котович И.В., Ежов А.Д., Сучкова П.И. Особенности газодинамики и теплообмена на поверхности лопаток

- 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.

Структура и объём диссертации.

В диссертации имеется введение, 5 глав, заключение, а также список литературы. Работа написана на 155 страницах основного текста, с 42 рисунками, 7 таблицами, а также списком литературы (167 позиций).

Решение задач, которые были представлены ранее, проведение критического анализа полученных результатов – все это сведено в соответствующих разделах исследования.

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

В первой главе критический анализ высокотемпературных газодинамических методов формирования защитных покрытий и технологии их формирования. Эти методы включают в себя распыление металла или его соединений в газовой среде, создание высокоскоростных потоков частиц, которые при столкновении с поверхностью образуют покрытие.

В работе проанализированы процессы и технологии следующих 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. 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, CO_2) проявляет высокую химическую агрессивность. Это оказывает необратимое отрицательное воздействие на исходные компоненты создаваемого покрытия, что в конечном итоге снижает его качество. Отражены главные преимущества, которыми обладает низкотемпературный газодинамический метод:

- вне зависимости от толщины, покрытие может быть нанесено с достаточно большой скоростью; допустим, покрытие из медного порошка на неподвижную подложку наносится со скоростью до 30 мм/с;
- покрытие по площади также наносится с высокой скоростью; чтобы сформировать толщину покрытия в 100 мкм на одном квадратном метре, требуется до 20 сек; все зависит от скорости движения подложки относительно гетерогенного потока;
- толщина покрытия может меняться в значительном диапазоне – от мкм до десятков миллиметров;
- метод обладает значительной степенью мобильности; может быть применён в стационарном варианте, на заводах на технологических линиях, в переносном варианте – в том числе, когда предстоит провести работы в полевых условиях;
- Возможна реализация НТГДМ технологии – единой операцией (однородное покрытие наносится в технологической цепи) или за несколько операций (при создании многофункциональных покрытий);

- минимальные энергозатраты при значительном КПД; допустим, чтобы нанести двустороннее покрытие с цинка в 50 мкм на кровельный стальной лист, для обработки 1 квадратного метра тратится 2 киловатта в час;
- конструкция – максимально надежная и простая у оборудования, с учетом автоматизации процесса;
- метод характеризуется простотой и универсализмом; дает возможность создавать многофункциональные покрытия разного качества;
- покрытия можно наносит даже на материалы с минимальной температурой плавления;
- предварительно поверхность детали обрабатывать не нужно.

Во второй главе излагаются физические основы комплекса процессов низкотемпературного газодинамического метода и его реализация на уникальном оборудовании. Показано, что физическая сущность реализации НТГДМ заключается в создании покрытий путем столкновения высокоскоростных (сверхзвуковых, $M > 1$) низкотемпературных 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. При этом гетерогенный сверхзвуковой поток формируется таким образом, что массовая доля частиц, образующих покрытие, не превышает 10% от массы газа-носителя.

Представлено описание принципиальной схемы установки для реализации НТГДМ; на ее основе создан лабораторный комплекс. Кроме прочего, в рамках настоящей главы представлены методики, согласно которым выполняется диагностика двухфазного потока и определение параметров синтезированных покрытий:

- использование доплеровской лазерной анемометрии в целях диагностики гетерогенных потоков;

- расчет плотности конвективной тепловой энергии;
- расчет поверхностных температур, что образуются при нагревании;
- расчет степени черноты покрытия.

В третьей главе представлены разработанная математическая модель задачи расчёта установившегося течения неизотермической гетерогенной смеси при наличии межфазного теплообмена и предложен упрощённый алгоритм её расчёта. В расчетах было установлено, что скорость движения частиц зависит от рода материала, а также от размера самих частиц, от плотности и скорости движения газового потока. Особенно важен характер течения газа-носителя в ускорительном устройстве.

Анализируется течение гетерогенной смеси в микро-соплах с существенным удлинением. 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%.

В работе представлена математическая приближенная модель, на основании которой ведется расчет течения при натекании гетерогенного сверхзвукового потока на преграду плоской формы; исследованы режимы инерционного движения частиц в сжатом слое. Было установлено, что режим течения газовой и твердой фазы вблизи поверхности зависит от двух

безразмерных комплексов для газа-носителя и частиц, $K_{\text{газ}}$ и K_p , соответственно, где:

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

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. Когда растет скорость частиц, то кинетическая их энергия достигает таких больших параметров, когда механизм контактного влияния частицы на подложку сильно трансформируется, 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). Среди прочего, было определено, что параметры динамических давлений при совместном ударе несколько значительны, что при ударе возникает процесс деформационного упрочнения материала частицы. И такое упрочнение имело высокую термическую стабильность; сохраняется даже после длительного отжига при температурах, которые существенно превышают температуру повторной кристаллизации материалов покрытий.

Далее в форме уравнения в раскрытой форме было представлено выражение энергии в зоне удара частицы с подложкой:

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

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 механические свойства материалов. Показано, что процессы формирования покрытий оказывают значительное влияние на повышение механических свойств поверхностного слоя детали. Сравнительно тонкий поверхностный слой покрытия из карбида ниобия (NbC) толщиной ~ 40 мкм заметно влияет на статическую прочность образца из CuAgZr. Установлено, что если при криогенных температурах напряжения разрыва $\sigma_{\text{в}}$ указанного материала с покрытием и без него совпадают, то в области повышенных температур (700K) $\sigma_{\text{в}}$ материала с покрытием возрастает до 20%.

Рассмотрены проведённые испытания на жаропрочность и термостойкость нескольких типов композиционных покрытий при воздействии на них высокотемпературного кислородо – водородного потока.

В заключении сформулированы основные результаты по диссертационной работе.

ГЛАВА 1 ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ

Надежность и долговечность изделий, работающих в высокотемпературной и окислительной среде, определяется такими свойствами материалов, как: жаропрочность, термостойкость и каталитическая активность поверхности изделий. Все эксплуатационные характеристики конструкций определяются свойствами поверхности. Для получения необходимых эксплуатационных характеристик на поверхностном слое изделий формируются разными методами разнофункциональные покрытия.

В данной главе анализируются разные газодинамические методы нанесения разнофункциональных покрытий. Проведён их критический анализ. Дано краткое описание разработанного на кафедре низкотемпературного газодинамического метода формирования покрытий (НТГДМ). Сравниваются характеристики НТГД-метода с альтернативными.

1.1 Принципы формирования покрытий.

Используемыми в настоящее время в промышленности технологии формирования защитных покрытий построены с использованием механических, термических и газодинамических принципов.

Технологии нанесения покрытий с использованием механических принципов построены на применении различного рода механических усилий. Такие методы характеризуются взаимодействием между материалом покрытия и поверхностью конструкции.

Технологии, которые позволяют формировать металлические покрытия, основанные на применении термических процессов, подразумевают нагрев до высоких температур. Это говорит о том, что материал покрытия может продиффундировать в тело поверхности самой

конструкции. В конечном итоге, описанный процесс помогает создать довольно прочную адгезию подложки и самого покрытия.

Газодинамические методы формирования покрытий сочетают совокупность технологий, при которых материал покрытия в виде порошка вводится в газовый поток, транспортируется к поверхности и при ударе осаждается на подложку, образуя покрытие. Технологии, разработанные на базе этих методов, позволяют формировать покрытия с высокой адгезией и необходимыми свойствами.

В настоящее время разработаны два типа газодинамических методов:

- Газотермические методы со значительным подогревом газа-носителя и частиц;
- Низкотемпературный газодинамический метод (НТГДМ) с низкой или умеренной температурой газа-носителя и частиц в сверхзвуковом гетерогенном потоке.

Подробный анализ различных газодинамических методов проведен в последующих разделах.

1.2 Сравнительный анализ газодинамических методов.

К серии газотермических методов, внедрённых в настоящее время в промышленности [1,2], относятся: плазменный, электродуговой, газопламенный, и детонационный [25...45].

Газотермические методы сочетают процессы нанесения покрытий из разных в том числе и из тугоплавких материалов. Технологический процесс организован таким образом, что материалы для формирования покрытия в виде прутка (проволока) или в виде порошка вводятся в высокотемпературный поток газа-носителя. В потоке они диспергируют, образуя мелкодисперсные частицы, которые ускоряются потоком газа-носителя до заданной скорости и, достигнув поверхности взаимодействуют с ней, создавая покрытие.

В промышленном производстве чаще всего в целях нанесения покрытий применяются следующие способы:

- Создание покрытий на основе металлической проволоки, посредством плазменной технологии;
- На основе порошков материалов той или иной дисперсности – газопламенная технология.

Газотермические методы позволяют создавать серию покрытий:

- коррозионностойкие для эксплуатации в агрессивных средах (жидкостях и газах) при низких, нормальных и высоких температурах в газовых химически активных потоках, в кислотах и щелочах, в растворах и расплавах солей и металлов. Среди прочего, данные покрытия отлично работают даже при фрикционном, эрозионном, а также абразивном износе, при наличии электрохимического воздействия и в прочих условиях;
- с высокой степенью износа для работы в сухом трении или при наличии смазки, при малом или высоком давлении, при удельной нагрузке, высокой и малой скорости перемещения, высокой и низкой температуре, и так далее;
- электропроводные, электроизоляционные покрытия с учетом разных факторов внешнего воздействия;
- покрытия антифрикционные и фрикционные, с учетом разной степени механических нагрузок;
- ингибиторы, а также катализаторы;
- радиопоглощающие, радиопрозрачные покрытия.

Газотермические технологии относятся к ресурсо- и энергосберегающим и широко внедряются в промышленности.

При использовании газотермических технологий масса наносимого покрытия составляет лишь доли процента от массы всей обрабатываемой детали. Последнее, практически, исключает затраты на предварительную или

последующую механическую обработку поскольку тонкий слой покрытия формируется с минимальными припусками.

В процессе создания покрытий газотермическими методами целесообразнее всего проводить упрочнение, а также восстановление поверхностей, которые будут в перспективе функционировать в условиях абразивного износа. Кроме прочего, для защиты поверхностей от коррозии, кавитации, эрозии можно применять также газо-термические методы. Допустим, при восстановлении лопастей турбогенераторов, гидрогенераторов, стенок камер сгорания ДВС, газовых турбин – метод считается допустимым.

Самые главные характеристики, при которых формируются покрытия упомянутым ранее способом – это:

- довольно широкий спектр применяемых материалов, а также их сочетание с температурой плавления от 600-3500 К;
- толщина слоя на деталях с чугуна, стали и цветных металлов может составлять от 0,1 мм до 15 мм. Лучше всего – 100 мкм до 3,5 мм;
- 100% автоматизация проводимого процесса;
- Наличие возможности менять состав, а также параметры – коррозионная устойчивость, твердость, устойчивость к износу и так далее; для этого применяется сочетание материалов с оптимальными теплофизическими, а также механическими особенностями;
- Не допускается термической деформации, а также структурных изменений материала детали, направляемой на обработку при напылении, так как нагревание – несущественное;
- Покрытие на детали формируется без ограничений по массе, а также по габаритам;
- Энергия и материалы применяются максимально рационально и экономно;

- Дорогостоящие материалы можно заменить на сравнительно дешевые аналоги, используя специальные покрытия.

Ради справедливости нужно сказать о том, что газотермические методы имеют некоторые недостатки:

- Когезионная, а также адгезионная прочность покрытий – сравнительно низкая; причина тому кроется в неполном схватывании частиц с поверхностью конструкции (низкая степень чистоты основания);
- Материал частиц испаряется быстро, так как подается газ-носитель с высокой температурой;
- Ряд покрытий обладает высокой пористостью;
- В дальнейшем нужно проводить термическую обработку конструкции с покрытием, чтобы не оставлять термических напряжений, которые образуются при сильном нагреве.

Далее в работе будет представлено описание принципа построения, осуществления критического анализа привычных газо-термических методов.

На рисунке 1.1 показана схема классификации упомянутых методов, на базе которых проводится нанесение покрытий.



Рисунок 1.1. Классификация газотермических методов нанесения покрытий

1.2.1. Газопламенный метод.

При формировании покрытий газопламенным методом необходимый запас тепловой и кинетической энергии сообщается частицам в процессе межфазного теплообмена с высокотемпературным потоком газа-носителя, создаваемым в результате горения горючего газа в кислороде [25...28]. В зависимости от способа подачи горючей смеси (газ и окислитель) в зону горения реализуются две зоны – зона перемешивания и зона диффузионного горения. По структуре созданный таким образом газовый поток образует два режима течения: ламинарный и турбулентный. Газовая смесь, истекаемая в неограниченное пространство, заполненное воздухом или другим газом, образует затопленную струю, называемую факелом.

Принципиальная схема построения метода приведена на рис. 1.2.

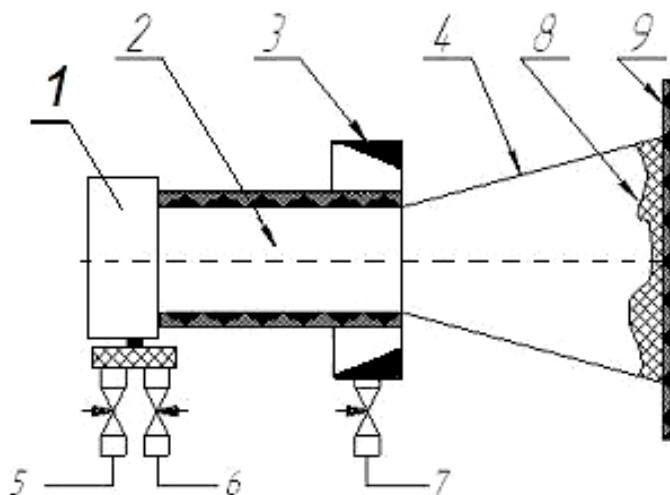


Рисунок. 1.2. Схема газопламенного метода нанесения покрытий.

1 – форкамера; 2 - ускоритель гетерогенной смеси;
3 – канал спутного потока; 4 - гетерогенный поток; 5 - горючий газ;
6 - кислород; 7 - сжатый воздух; 8 - покрытие; 9 - обрабатываемое изделие.

Итак, газ 5, а также окислитель 6 (в качестве последнего выступает кислород; за некоторыми исключениями может использоваться воздух) направляются в форкамеру 1. Образованная горючая смесь движется в камеру сгорания 2. Там проводится поджиг смеси, горит газовое пламя факелом 4. Чтобы осуществить обжиг газового пламени, практически используют 3 – дополнительный канал. В него закачивается сжатый газ, как правило – воздух.

Физические его показатели доводятся до параметров применения устройства

7. Снаружи воздух образует поток, который удлиняет высокотемпературный участок струи газа; именно так увеличивается скорость струи газа.

Для покрытия применяется порошок или проволока. Их подают по оси струи пламени. Благодаря такому способу подачи можно быстрее проводить нагрев, а также распылять материал. Горючими газами-носителями в данном случае выступают ацетилен, метан, бутан, пропан, водород и некоторые другие газы. Бывает так, что применяют смеси газов, например, пропан+бутан. Для того чтобы получить еще большую температуру пламени, стоит применять ацетилен-кислородные смеси. Но в таком случае уместно задействовать технический ацетилен по ГОСТ 5457-75 или пропан-бутановую смесь по ГОСТ 20448-80.

В процессе образования струй пламени с газа тепловой коэффициент полезного действия будет достигать 80-90%. Тогда большая часть подводимой энергии используется именно на нагревание газа. Впрочем, эффективный КПД нагревания частиц – лишь около 0,02-0,1.

Таким образом, рекомендуется достигать парциального давления горючего газа в камере сгорания $P_{гор} > (20...40) \cdot 10^3$ Па. Соответственно расход горючего газа по массе рассчитывают на основе технологии производства; параметр может меняться в рамках $G_{газ} = 1.5...2.5$ м³/ч. Принимая во внимание предназначение, род покрытия, максимальной температура пламени может быть 3500 К.

Что касается скорости газопламенной струи, то она может меняться в рамках 150...300 м/с; расчет параметра ведется с учетом расхода горючего газа, с учетом профилирования канала ускорителя, с учетом соотношения между окислителем и непосредственно горючим газом.

Как правило, скорость частиц не составляет больше 100 метров в секунду. В то же время температура их при использовании порошковой технологии нанесения составляет 2500 К, а при использовании проволоочной технологии – 3000 К. В конечном итоге достигается адгезия покрытий с обработкой газопламенной технологией – не более 50 Мпа.

Практика показывает, что в последнее время в газопламенном процессе достаточно активно применяются гетерогенные сверхзвуковые струи.

Перечислим центральные преимущества, которыми обладает газопламенный метод:

- Низкая стоимости технологии, а также оборудования для ее реализации; метод – надежный и достаточно прост в практической реализации;
- Низкий уровень шума, светового излучения;
- Образуются покрытия с тугоплавких материалов, плавление которых протекает при температуре до 3000 градусов Цельсия;
- Большой коэффициент применения материалов. Так, если задействовать проволочную технологию, то данный коэффициент будет высоким, меняется в рамках 0.95...0,98.

Впрочем, метод имеет и некоторые недостатки:

- Химические реакции расплавленных частиц с активной окислительной средой газа-носителя;
- Наличие кислорода в потоке газа также снижает спектр материалов, используемых для формирования покрытий;
- Данным методом невозможно формировать надёжные покрытия из карбидов, боридов, нитридов и силицидов, поскольку в процессе горения они могут разлагаться и не сохранять своих теплофизических и механических свойств;
- В высокотемпературном потоке газа-носителя при наличии в нём продукта сгорания CO_2 реализуется эндотермическая реакции диссоциации молекулы:
$$2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2; 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$$

Реализация этой реакции в потоке уменьшает его температуру, что исключает в данной технологии формирование покрытий с высокой термостойкостью.

Назовем особенно критические недостатки:

- Образуется низкая адгезия на нормальный отрыв – 15-50 Мпа;

- Пористость покрытий достигает 5-25%;
- Малая степень интенсивности процесса межфазного теплового обмена;
- Малая производительность, в частности – при нанесении покрытий с материалов, которые трудно плавятся.

1.2.2. Электродуговой метод.

В электродуговом методе [24, 26, 28, 37, 38] процесс формирования покрытий протекает при плавлении материала покрытия в электрической сильноточной дуге с распылом расплава скоростным газовым потоком. В конечном счете, образуется гетерогенный поток (частицы сочетаются с газом-носителем). На рисунке 1.3 показана принципиальная схема метода – двухэлектродная.

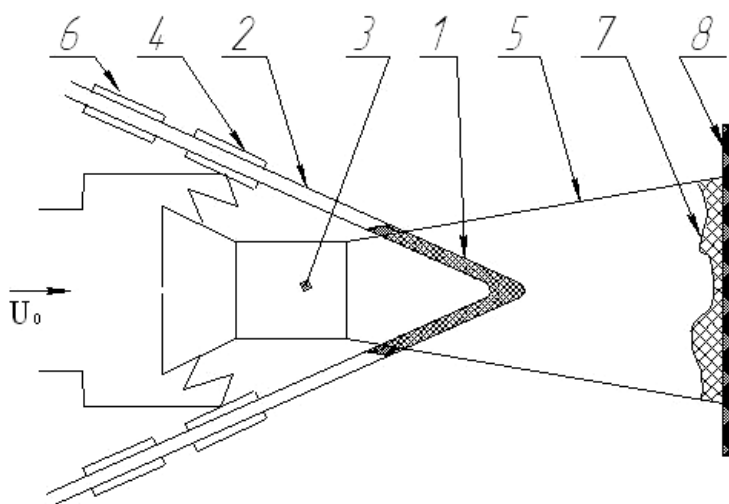


Рисунок. 1.3. Схема электродугового метода формирования покрытий.

1 – электрическая дуга; 2 — электроды – проволока из наносимого материала; 3 — канал подачи газа-носителя; 4 — электроконтактные устройства; 5 — гетерогенный поток; 6 — механизм подачи проволоки; 7 — покрытие; 8 — обрабатываемое изделие.

Для создания покрытия применяется материал – проволока 2 с диаметром 1-5 мм; подача ее осуществляется в зону 1 горения дуги с помощью специального 6 механизма. С источника питания U_0 осуществляется подвод

напряжения к контакторам 4. Канал 3 – это устройство для создания холодного потока газа-носителя.

Скорость подачи проволоки составляет 0.05...0.35м/с., в этой связи производительность расхода материала в электродуговом методе варьируется в пределах 2...50 кг/час в зависимости от типа покрытия.

В технологиях формирования покрытий на поверхности изделий из углеродистых сталей максимальный размер частиц, используемых в процессе 30...50 мкм, для изделий из прочих металлов дисперсность частиц изменяется в пределах 10...100 мкм [45].

В непосредственной близости от обрабатываемой поверхности скорость газа носителя, а также частиц составляют примерно одинаковый показатель – 50...150 метров в секунду.

При указанных выше скоростях потока и перегреву частиц до температуры плавления в зоне горения дуги, не смотря на относительно низкую температуру газа-носителя, большинство частиц при взаимодействии с поверхностью находятся в расплавленном состоянии. Считается, что данное утверждение основано на анализе структуры покрытия, которое наносится. Прослеживается отчетливая деформация частиц в форме чешуек, что характерно при образовании покрытий с помощью расплавленных частиц.

Значительная производительность при создании покрытий с применением электродугового метода получается при высокой плотности потока частиц, накладываемых на поверхность. Некоторые исследования показали, что такая плотность достигает $10^3...10^5$ частиц/см²с. Добавим, что удельный мощный расход при работе стационарного оборудования составляет от 0,3 до 1,3 кВт на килограмм. Бывает так, что толщина покрытия варьируется от микронов до десятков миллиметров.

В процессе проведения аналитической работы было установлено, что электродуговая технология выступает в качестве одной из самых рентабельных среди всех технологий работы с газо-термическими методами. Энергетический КПД метода составляет 0,7...0,9, а не 0,07...0,09, как в случае с применением газопламенной технологии. Также стоит особенно обратить внимание на тот факт, что электродуговой метод отличается высокой

производительностью. Массовый расход материала в процессе нанесения покрытия – более 50 кг в час. Так как расплавленные частицы в гетерогенном потоке имеют высокую температуру, удастся создавать покрытия с высокой когезионной, а также адгезионной прочностью, с более меньшим параметром пористости. В целом, благодаря заявленному методу можно реализовать не просто однородные, но и также композиционные покрытия. За счет применения 3х-электродной схемы, в устройстве горения дуги подучают технологию формирования покрытий с трех разных материалов. Это называется трехкомпонентной технологией.

Впрочем, метод электродугового напыления имеет недостаток – расплавленные частицы могут химически реагировать с газовой фазой потока-носителя. Вот почему покрытие содержит значительное количество оксидов и нитридов. Исключение этого процесса из технологии как правило выражается в значительных дополнительных затратах.

Ещё одним из серьёзных недостатков электродугового метода выражается также ограничении спектра наносимых покрытий. Это объясняется тем, что разработанная для данного метода технология формирует электропроводные металлические покрытия. В этой связи площадь активных пятен привязки дуги на электродах ограничена небольшими диаметрами, используемых для плавления и диспергирования проволок. Кроме того, горение электрической дуги реализуется в условиях воздействия скоростного холодного газового потока. Это обуславливает сжатие и растяжение (контрагирование) столба дуги. Последнее вызывает переменность ее электрических, а также и термогазодинамических и теплообменных параметров.

Кроме указанных недостатков данным методе в следствие неравномерного распределения частиц покрытия по диаметру потока реализуются в технологии нежелательные потери частиц порошка, а также неравномерность в толщине покрытия.

В процессе практической реализации метода в рамках промышленности применяется 2 схемы горения дуги: без замыкания и с периодическим замыканием электродов. В том случае, если оборудование для

такого метода создается на базе переменного тока, то не допустить коротких замыканий не получится.

Если же оборудование данного метода построено на применении источников постоянного тока, то появляется возможность организовать технологический процесс, исключив короткие замыкания электродов. Но в таком случае возникает необходимость дополнительных финансовых затрат в связи с усложнением оборудования.

1.2.3. Плазменный метод.

Известно о том, что в этом методе в целях создания защитных покрытий применяют плазменный или высокотемпературный поток; в качестве источника нагрева и передачи частиц к обрабатываемой поверхности [28...31, 37, 39]. Плазменный скоростной высокотемпературный поток (несколько тысяч градусов), обеспечивает возможность формирования покрытий из любых и даже тугоплавких материалов.

В технике потоки газовой плазмы создают различными методами:

- С использованием электрической дуги в качестве источника нагрева газа-носителя, перемещая газ вдоль шнура дуги, горячей между двумя электродами (плазмотронный метод);
- С использованием высокочастотного индукционного подогрева газа-носителя (высокочастотный плазмотрон);
- С использованием лазерных источников нагрева.

Применение плазмотронных методов позволяет создавать различные типы газовых потоков: дозвуковые, сверхзвуковые, турбулентные и ламинарные. Проведённые многочисленные исследования позволили сделать рациональное заключение, что современный уровень плазменной технологии нанесения покрытий должен базироваться на использовании дозвуковых турбулентных струй с использованием в качестве газа-носителя широкий спектр газов с разными теплофизическими свойствами. Для образования плазмы, в качестве газов-носителей применяют разной чистоты газ аргон, азот технический, аммиак и водород, воздух, гелий, прочие газы (в том числе смеси

таких газов). Температура плазменного потока достигает уровня 5000...10000K, а скорость истечения 100... 1500 м/с.

Частицы порошка в потоке плазмы нагреваются до высокой температуры и приобретают пластифицированное или расплавленное состояние. Экспериментально установлено, что в зависимости от скорости плазменного потока газа-носителя они разгоняются до уровня скоростей 50...200 м/с и более.

Устройства, которые создают потоки плазмы в плазменной технологии производства могут быть совершенно разнообразными. На рисунке 1.4 показана принципиальная схема плазменного генератора. Итак, в плазменных методах в целях формирования покрытий обычно применяется оборудование, как порошковых, так и проволоочных технологий. В первом случае применяются дозаторы порошка или 3 – устройства подачи проволоки с разной скоростью подачи.

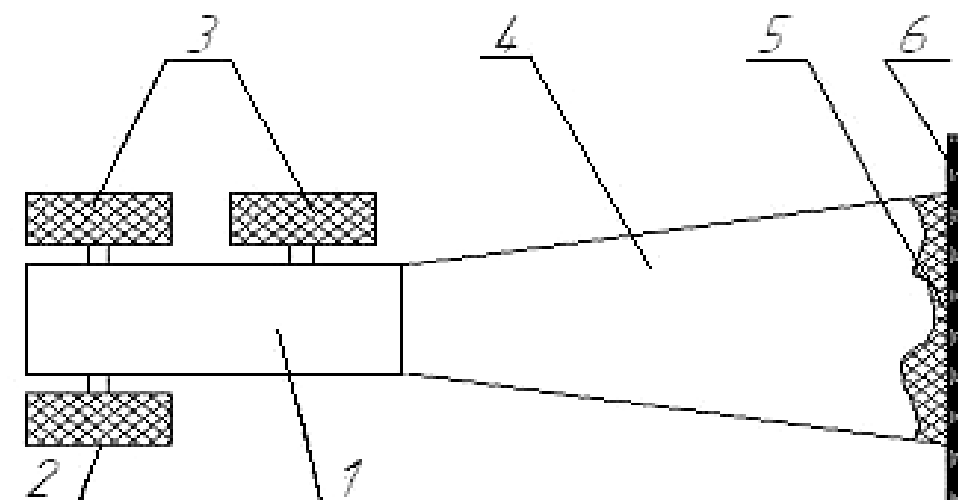


Рис. 1.4. Схема устройства для нанесения покрытий плазменным методом.

- 1 - электродуговой нагреватель газа (плазмотрон); 2 - система подачи плазмообразующего газа (газа-носителя); 3 - система подачи порошка или проволоки; 4 – гетерогенная плазменная струя;
5 - покрытие; 6 - обрабатываемое изделие.

Как правило, производительность метода основывается на массовой скорости подачи порошка. Для того или иного типа плазменных устройств

этот параметр достигает 0,25-2 г/сек. В то же время при проволочных способах обычно применяют проволоку, диаметр которой составляет в сечении от 0,8 до 2,5 мм. Примечательно, что в случае превышения диаметра проволоки растёт средний размер частиц. Далее, среднемассовая температура газа плазменной струи на срезе сопла может составлять от 4000 до 7000С.

В пятне интегральная плотность частиц составляет $10^3 \dots 10^5$ ч/см²сек. Рассчитать толщину покрытий можно на основании параметров использования изделия, меняется от 5 микрон до 2 мм. Для создания покрытий также меняется и производительность оборудования. В среднем это от 0,5 до 10 кг в час. Для адгезии прочность составляет 60-80 МПа; все зависит от того, какого рода будет базовое покрытие.

Известно о том, плазменный метод имеет неоспоримые преимущества. Прежде всего, они состоят в 100% автоматизации процесса создания самого покрытия. В то же время газодинамические, а также электрические параметры оборудования могут быстро регулироваться в автоматическом режиме. Также среди преимуществ стоит отметить высокую производительность плазмотронов с электрической мощностью до 150 кВт. Коэффициент применения порошка составляет при этом 0,5...0,97. В остальном все зависит также от материала покрытия.

Главное преимущество, которое стоит выделить в процессе применения плазменного метода – это возможность нанесения покрытий, как на малые, так и на большие площади поверхности; на детали, которые имеют сложную форму. Газовый плазменный поток обладает высокой температурой, которой нет в случае применения газо-пламенного метода. Таким образом, частицы могут нагреваться до существенно высоких температур.

Далее стоит сказать о том, что плазменные покрытия по сравнению с газопламенными, электродуговыми и прочими – обладают высокой плотностью, а также лучшей адгезией с основанием. Допустим, при создании покрытия на основе плазменного метода частицы в подложку могут проникать в момент удара глубже, чем при газопламенной технологии. В переходной

зоне толщина в образцах при применении плазменного метода зоны интеграции частиц в материал подложки достигает 10...50 микрон. Но при газопламенном методе этот параметр не превышает 2-5 микрон. Далее обозначим преимущества анализируемого метода: комплексная автоматизация, механизация процесса, масштабность метода на производстве и некоторые другие.

К большому сожалению, плазменный метод также имеет некоторые недостатки. Прежде всего, в генерирующих установках, в которых образуется плазменный поток, реализуются экстремальные плотности тепловых потоков в электроды, в пятне привязки дуги ($10^8 \dots 10^{10}$ Вт/м²). В конечном итоге, сначала протекает процесс плавления, а потом и испарения материала электродов. На основе протекания данного явления существенно ограничивается ресурс работы электродов плазмотрона. Вместе с тем, испарения от электродов поступают в газ-носитель, внося ненужные примеси, отчего ухудшается свойство наносимого покрытия.

На основании тщательного изучения баланса распределения мощности электричества в плазмотронах установлено, что для нагрева газа, образующего плазму, используется порядка 50% энергии (КПД тепловой у плазмотронов составляет 50-70%). Оценки также показали, что часть энергии плазменной струи, что используется на нагрев частиц в потоке – не такая существенная. Происходит изменение эффективного КПД нагрева частиц в рамках 0,01...0.15. Таким образом, как только начинается процесс образования покрытий, практически проблематично достичь равномерного прогрева частиц с разным диаметром. Причина – недостаток времени пребывания частиц в потоке плазмы – примерно $10^{-2} \dots 10^{-3}$ сек.

Также был проведен анализ баланса распределения мощности в плазмотронах, который показал, что для нагрева газа-носителя используется больше 50% энергии. Согласно оценкам, доля энергии плазменной струи, используемая для нагревания частиц – незначительная. Происходит изменение эффективного КПД нагрева частиц в рамках 0,01...0.15. Таким

образом, как только начинается процесс образования покрытий, практически проблематично достичь равномерного прогрева частиц с разным диаметром. Причина – недостаток времени пребывания частиц в потоке плазмы – примерно $10^{-2} \dots 10^{-3}$ сек.

Высокий уровень газовой энтальпии в потоке плазмы накладывает ограничения на потенциал применения их в целях нанесения покрытий на проволоку, фольгу, капилляры и прочие мелкие детали, с тонкими стенками. Стоит подчеркнуть, что речь идет о принципиальных ограничениях, избавиться от которых невозможно методом снижения мощности плазмотронов.

В качестве недостатка, которым обладает плазменный метод, стоит назвать высокую температуру газа-носителя. Она перегревает частицы выше, чем температура их плавления. В конечном итоге много частиц попросту испаряется, а потому нельзя использовать мелкодисперсные частицы при создании покрытия. Практика показывает, что использование мелкодисперсных частиц улучшает качество покрытия и снижает его пористость.

Что касается плазменных покрытий, то они обладают сравнительно невысокой когезионной, а также адгезионной прочностью сопряжения. Чтобы повысить данные параметры, в методе применяют особые технологии очистки поверхностей, которые подлежат обработке.

Принимая во внимание тот факт, что частицы в потоке приводят к образованию турбулентности, определенное количество частиц может выходить с ядра на периферию. Именно там они быстро охлаждаются. Таким образом, даже при работе с мелкодисперсными частицами с большой теплопроводностью, в одном сечении потока может происходить концентрация частиц с разным агрегатным состоянием. Среди прочего, в потоке могут быть выделены частицы неоднородного состояния; все это также вызывает появление низкокачественного покрытия.

Согласно экспертным оценкам, твердение частиц при создании покрытия протекает примерно за $10^{-5} \dots 10^{-7}$ сек. Физика твердого тела показывает, что стремительное охлаждение расплавленного металла вызывает некоторые аномалии. Так, в объеме формируется мелкокристаллическая структура. Фиксируются метастабильные структуры, проходит аморфизация, пересыщенные растворы.

Если при создании покрытия будут использоваться не 100% проплавленные частицы, в том числе частицы с вторично затвердевшей внешней оболочкой, то напыляются тугоплавкие оксиды, металлы турбулентными плазменными струями. При увеличении численности данных частиц образуется рыхлая структура с довольно большим размером пор.

Добавим, что при использовании плазменного метода образования покрытий образуются поры при сильном перегревании материала, при быстром испарении частиц.

Поры 2-15%, высокое содержание нитридов, оксидов, прочих включений, плохое сцепление частиц при плавлении между собой – все это снижает адгезию, когезию будущего покрытия. Содержание азота и кислорода может составлять десятые доли процента и больше, что также понижает прочность, пластичность материала на покрытии.

Достаточно значительный недостаток покрытий, созданных плазменным методом – появление термических внутренних напряжений, которые образуются как в каждой частице, так и в слое покрытия, в целом. Подобные напряжения приводят к тому, что покрытия при остывании начинают разрушаться. Тем не менее, уже сейчас известны некоторые способы, что практически позволяют бороться с термическими напряжениями. Впрочем, с их применением усложняется технология создания покрытий.

Процесс формирования покрытий с применением плазменного метода вызывает высокий уровень шума – примерно 60-120 дБ.

Еще один недостаток плазменного метода – высокое излучение от плазменной струи, высокая стоимость применяемого оборудования и его громоздкость.

1.2.4. Детонационный метод.

Практика показывает, что в процессе детонационного метода нанесения покрытий применяются устройства, которые в комплексе образуют принципиальную схему действия технологии [32...34, 38, 45] – рисунок 1.5.

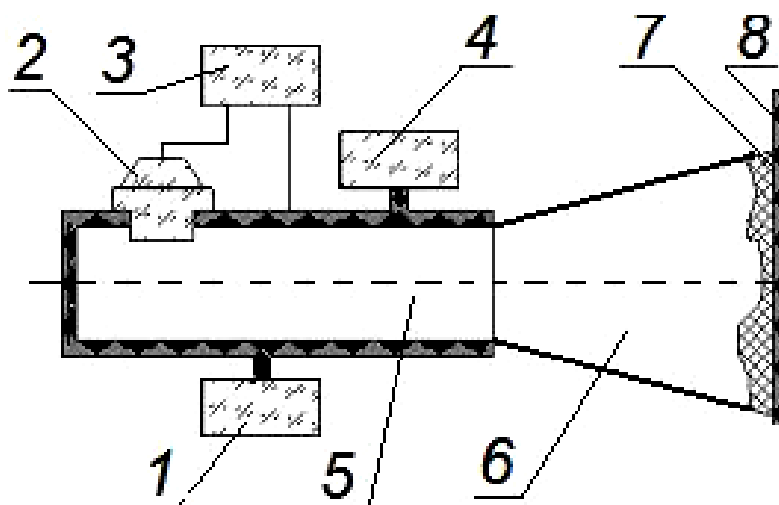


Рисунок 1.5. Схема детонационного метода нанесения покрытий:

1- блок подачи и регулирования параметров газа (горючего и окислителя), 2 - воспламенитель смеси, 3 - блок инициирования взрыва, 4 - дозатор порошка, 5 – камера детонации смеси, 6 – гетеро-генный поток, 7 - покрытие, 8 - обрабатываемое изделие.

Итак, 1 – устройство, которое заполняется газами с требуемыми параметрами. Важно, что эти газы склонны к детонации. Смесь направляется в камеру 5. 3 – устройство, в котором проводится выработка импульса для воспламенителя. 4 – устройство, заполняемое массой порошка, который далее поступает дозатором в камеру 5. Как только гетерогенная смесь в камере сдетонирует, поток порошка с газом устремляется в газодинамический ускоритель, и там уже гетерогенная смесь развивает расчетную скорость. 2 – это устройство воспламенения; тут проводится зажигание газовой смеси, как правило, около торцевой стенки камеры. Распространение пламени

начинается вдоль камеры, причем скорость его постоянно растет. После некоторой дистанции, горение превращается в детонацию, и с тех пор по всей камере распространяется волна с такой скоростью, которая строго определена для геометрии конкретной камеры, с учетом состава газа. Под детонационной волной принято рассматривать ударную волну в комплексе с химической реакцией. Сжатие газа в рамках ударной волны происходит до десятков атмосфер. Растет существенно температура до тысяч градусов, и газовая смесь тут же вступает в реакцию.

Позади ударной волны располагается место протекания химических реакций, в том числе – продукты детонации с высокой температурой и давлением. Следуют они за детонационной волной с такой скоростью, которая, однако, будет меньше, чем скорость детонационной волны. Как только волна достигнет открытого участка камеры, она разрушается, так как перемещаться может только в газовой смеси. Продукты детонации выходят с камеры в ускоритель, на срезе которого гетерогенный поток достигает скорости выше скорости звука.

Далее газообразные продукты начинают разгонять порошок до заданной скорости. Гетерогенный поток в ускорителе не является однородным, не только по длине, но и также по сечению. Это явление обуславливается отсутствием стационарного процесса истечения, разницей физических, химических качеств частиц. При высокой температуре газ-носителя начинается плавление, а также испарение частиц.

Отметим, что в сравнении с прочими газо-термическими методами покрытия, покрытия, образованные детонационным способом, получаются довольно прочными. Адгезия в данном случае достигает 160 Мпа. Закрытая пористость – минимальная, газопроницаемость не наблюдается.

В то же время рассматриваемый способ покрытия позволяет получить устойчивые к коррозии и износостойкие покрытия. Благодаря детонационному методу решаются такие задачи, которые прочие способы бы решить не помогли. Температура частиц в гетерогенном потоке в импульсе при формировании слоя покрытия отвечает практически температуре плавления. В слое покрытия не будет границы между частицами. Оценив

покрытие под микроскопом, можно отметить его монолитность, впрочем, есть границы между импульсными слоями.

Помимо нагревания, при ударе о подложку частицы достигают колоссальной кинетической энергии. Вот почему в процессе взаимодействия с поверхностью происходит их деформация, а значит, снижается пористость, многочисленные другие дефекты. Температура, до которой подогревается подложка в процессе детонационного метода, на порядок меньше, чем в случае с применением плазменного метода. Также при детонационном методе по причине высокого качества покрытия нельзя получать тонкие слои с малой массой наряду с большой степенью износостойкости.

Если сравнивать детонационный метод с прочими газо-термическими методами нанесения покрытий, первый вариант – дискретный, с направленной концентрацией полезной энергии. В таком случае покрытия можно наносить даже на материалы, у которых физически температура плавления низкая. Кроме прочего, материалы, как ткань или полимер могут располагаться далеко от сопла, где зона детонации ослаблена.

Посредством детонационного метода выполняется импульсная обработка материалов – существенно концентрируется энергия в гетерогенном потоке, что есть экономически целесообразно. Практика показывает, что устройства импульсного воздействия в основной массе своей имеют высокую удельную мощность, просты в трансформации энергии.

В целом же, детонационный метод проще и надежнее, чем плазменный. Так, можно проводить нанесение даже металлокерамических сплавов повышенной твердости на основе оксидов, карбидов, тугоплавких металлов – хрома, вольфрама, титана и так далее. В то же время свойства покрытий почти не будут отличаться от свойств точно таких твердых сплавов, которые получены путем термического спекания.

Среди прочих преимуществ, которыми обладает детонационный метод, можно обозначить значительность номенклатуры наносимых материалов в качестве покрытия (за исключением металлов); стабильность расхода ингредиентов; и некоторые другие.

В процессе перемещения двухфазного потока по газодинамическому тракту частицы превращаются – охлаждаются и плавятся, кристаллизируются, коагулируют, дробятся, испаряются, взаимодействуют со стенками камеры, реагируют в химических реакциях с кислородом и так далее. Вместе с тем, высока доля испарения частиц. При 3000 К частицы оксида алюминия с диаметром до 2 микрон испаряются за время полета на 100%. Цинк и медь, алюминий, прочие легкоплавкие металлы могут полностью испаряться при дисперсности до 100 мкм.

Что касается тех частиц, которые затягивает в поток за 1 миллисекунду после детонационной волны, то они нагреваются меньше, так как за заданное время температура продуктов детонации уже снижается.

В качестве базовых компонентов для газовой смеси в рассматриваемом методе выступают кислород и ацетилен. Если по тем или иным причинам в смеси становится больше ацетилена, то в продукте детонации образуется сажа, свободный углерод. Ее наличие в газе-носителе недопустимо, так как углерод – дефективное включение, которое понижает прочность покрытия. Но в случае увеличения более 56% концентрации кислорода формируется покрытие с легко окисляющихся материалов, что есть также недопустимым явлением.

Многочисленные аналитические изыскания показывают, что производительность технологии детонации – невелика в сравнении с плазменной технологией. Оборудование в зависимости от решаемых задач может быть сложным. Вот почему меняется и его окончательная стоимость. Мало того, много средств нужно вложить на строительство помещений под такое оборудование. Высокий уровень шума в 125-140 децибел приводит к потребности создания звукоизоляции и герметичности помещений, а управление оборудованием должно быть дистанционное.

При применении детонационного метода возникают и некоторые ограничения по части получения покрытий с таких материалов, в составе которых будут активно взаимодействующие с компонентами детонационной смеси элементы. Трудно наносить покрытие на подложки с высокой твердостью поверхности $HRC > 60$.

Также практически невозможно наносить покрытия с порошков, удельная масса которых является невысокой: например, карбид титана. Покрытия в отверстиях, в кавернах глубиной больше диаметра входного отверстия – указанным способом наноситься не могут.

1.2.5. Низкотемпературный газодинамический метод (НТГДМ).

Характерное отличие данного метода [7, 10...12, 21...23] от альтернативных методов, рассмотренных ранее – состоит в низкой температуре газа-носителя, примерно до 700 К. В таком случае частицы порошка в потоке нагреваются слабо, менее 10% от температуры, при которой начинается плавление частиц материала. В случае с низкой температурой газа-носителя химические реакции между твердыми частицами и газом исключены. Это позволяет достигать постоянного состава частиц по компонентам при создании покрытия, чего не может быть при других условиях. Низкая температура потока газов приводит к тому, что в НТГДМ технологии применяются всякого рода недорогие газы – от азота до технического воздуха или даже углекислый газ.

Покрытие при рассматриваемом методе образуется с учетом воздействия высоких скоростей движения частиц – 500-1500 метров в секунду. Это на порядок больше, чем у прочих газо-термических методов, однако сопоставимо с детонационным методом.

Исследования показали, что наращивание скорости частиц и давления в связи в момент удара по поверхности снижает энергию активации взаимодействия частицы и стенки изделия. Увеличение давления в контакте с 1 до 7 Мпа снижает на 15-20% энергию активации [40,41]. И это на 50-100% наращивает прочность связей при создании покрытия. Добавим, что по мере увеличения скорости частиц растут механические параметры непосредственно слоя покрытия.

Малая температура и скорость газа носителя выше скорости звука при создании покрытия – это идеальные условия, в которых можно применять мелкодисперсные порошки, где диаметр частиц будет менее 30 микрон. В

таком случае можно достигать скорости частиц, что приближается к скорости газа-носителя. В конечном итоге, микроструктура покрытия, в том числе мелкие частицы получается плотнее. Нанесенное покрытие имеет плотность на 1-1,5% выше, чем у самого материала. Практика показала [13,15], что мелкие частицы в покрытии получают при таком методе большую упорядоченность; укладываются и лучше сцепляются, нежели в покрытии с крупнодисперсных частиц.

Технология НТГДМ имеет преимущества в сравнении с другими методами, которые были рассмотрены ранее. Все преимущества без исключения продиктованы механизмами формирования самого покрытия. Так, при совместных ударах высокоэнергетических частиц с подложкой наблюдается сдвиговая взаимная деформация. Сопряженные поверхности активируются, снимается оксидная пленка и прочие виды загрязнений. При ударном воздействии высокоскоростных частиц с подложкой в месте контакта образуется достаточной силы импульс давления; сильно растет температура на месте контакта.

В таблице 1 с целью сравнительного анализа приведены основные характеристики формирования покрытий различными газодинамическими методами [24].

**Таблица 1 Основные характеристики формирования покрытий
газодинамическими методами**

Параметры	Газо-плазменный	ЭДМ	Плазменный	Детонационный	НТГДМ
Размер частиц, мкм	10...100	10...100	10...100	10...50	2...40
Температура газа-носителя, °С	от 2000 до 3000	6000	от 5000 до 20000	от 3000 до 5500	до 600
Температура частиц, °С	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...150	3...4	0,2...6	0,1...5000

Основные преимущества низкотемпературного газодинамического метода создания покрытий обуславливаются технологическим потенциалом самого метода. Прежде всего, суть их кроется в следующем:

- По толщине покрытие может быть нанесено с высокой скоростью. Например, на неподвижной подложке с медного порошка покрытие наносится со скоростью в 30 мм в секунду;
- Плотность нанесенного порошка – высокая. На 1 квадратном метре напыление в 25 мкм длится 20 секунд, определяется скоростью движения подложки касательно гетерогенного потока, производительности оборудования;

- Толщина покрытия может меняться от микрона до нескольких десятков мм;
- Метод достаточно мобильный. Может применяться как в стационарном, так и мобильном исполнении;
- Технология НТГДМ может быть реализована одной или несколькими операциями одновременно;
- Простота, универсальность метода дает возможность создавать многофункциональные покрытия;
- Технология обеспечивает нанесение покрытий на материалы даже с низкой температурой плавления;
- Не нужно предварительно очищать поверхность детали;
- Экологическая чистота, наукоемкость НТГДМ технологии.

Выводы по главе 1.

проведено критическое сопоставление низкотемпературного газодинамического метода нанесения разнофункциональных покрытий с альтернативными методами. Установлены преимущества метода по сравнению с плазменным, газопламенным детонационным и другими. Например, показано, что низкая температура двухфазной 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.

НТГД метод обеспечивает:

- Высокие технологические параметры: универсальность, простоту и мобильностью низкие энергозатраты, простоту в управлении процессом при высокой степени автоматизации, экологическую чистоту процесса;
- Высокая производительность и экономичность процесса формирования покрытия по сравнению с альтернативными методами.

ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСА ПРОЦЕССОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА УНИКАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

2.1. Физическая сущность низкотемпературного газодинамического метода.

Основной принцип 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 [9,14]. 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 [90,138].

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 микрон. 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. Например, чтобы достичь скорости газа-носителя, в два раза превышающей скорость звука, температура газа в форкамере не должна превышать 300°C при давлении в 1,0 МПа.

Основное достоинство низкотемпературного газодинамического метода (НТГДМ) по сравнению с другими методами газотермического напыления, такими как плазменное, электродуговое, газопламенное и детонационное, заключается в том, что создание покрытия происходит благодаря высокой кинетической энергии частиц, в то время как их температурный уровень остается значительно ниже точки плавления. Это предотвращает физико-химические изменения в материале порошка, позволяя частицам достигать подложки в первоначальном состоянии, независимо от их размера. Более того, благодаря низкой температуре, в качестве газа-носителя можно использовать дешёвый сжатый воздух.

Научный подход к созданию покрытий с помощью НТГДМ основан на физическом принципе понижения статической температуры газовой фазы и частиц при одновременном увеличении скорости гетерогенного потока в канале [9...12]. В конечной стадии ускорения, частицы набирают высокую кинетическую энергию, которая при контакте с основанием преобразуется в различные виды энергии, включая энергию, необходимую для формирования межатомных связей.

Исследование показали [13,15]: процесс столкновения частиц с высокой кинетической энергией с подложкой схож с процессом сварки взрывом. В точке соприкосновения частицы и поверхности изменяются кристаллические решётки материалов, кроме того контактирующие поверхности становятся химически активными. Дополнительно, в точке соприкосновения возникают динамические явления, такие как динамическая диффузия, вызванные местным давлением и повышением температуры при

ударе. Эти процессы в совокупности способствуют высокому уровню адгезии и когезии покрытий, а также их упрочнению на протяжении всей толщины.

Благодаря низкой температуре струи, метод позволяет значительно увеличить дисперсность используемых частиц, избегая их физико-химических изменений. Это улучшает заполнение покрытия, повышает его плотность, уменьшает объем микропустот и делает микроструктуру более однородной. В результате, можно сократить толщину покрытия без потери качества, что приводит к экономии материала.

Технология НТГДМ в процессе создания термостойких керамических покрытий позволяет применить технологию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) за счет добавления в порошок небольшого количества термитных компонентов. При столкновении частиц с подложкой достигаются необходимые температура и давление для активации этих компонентов, что приводит к экзотермическим реакциям и выделению тепла, улучшая адгезионные и когезионные свойства покрытия.

Ударно-волновые эффекты, возникающие при использовании НТГДМ, запускают процессы динамической диффузии на границах раздела между покрытием и подложкой, а также между отдельными частицами, что способствует диффузионной сварке высокоплавких частиц, которые обычно не соединяются стандартными методами.

В результате ударно-волновых нагрузок и диссипации кинетической энергии в месте соударения происходят физико-химические и фазовые превращения как между подложкой с первым слоем покрытия, так и в последующих слоях в объёме покрытия. Эти процессы ведут к изменению кристаллической решётки исходных материалов и могут привести к формированию новых материалов.

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. Допустим, чтобы создать 1 мм слоя интерметаллида NiAl на пятне, диаметр которого составляет 10 мм, нужно десятая доля секунды, а традиционные термические методы позволяют сформировать 60 мкм переходную зону за 9 часов при температуре 970 К.

Изучив потенциал НТГДМ технологии было установлено, что это универсальный метод, благодаря которому можно получать разные по функциональности покрытия; можно синтезировать на них всякие поверхности. Кроме прочего, технология является мобильной, как в стационарном, так и переносном варианте. Предварительная подготовка обрабатываемой поверхности не требуется.

2.2. Блок-схема стенда и его описание.

Реализация НТГДМ-технологии представлена в виде блок-схемы на рисунке 2.1.

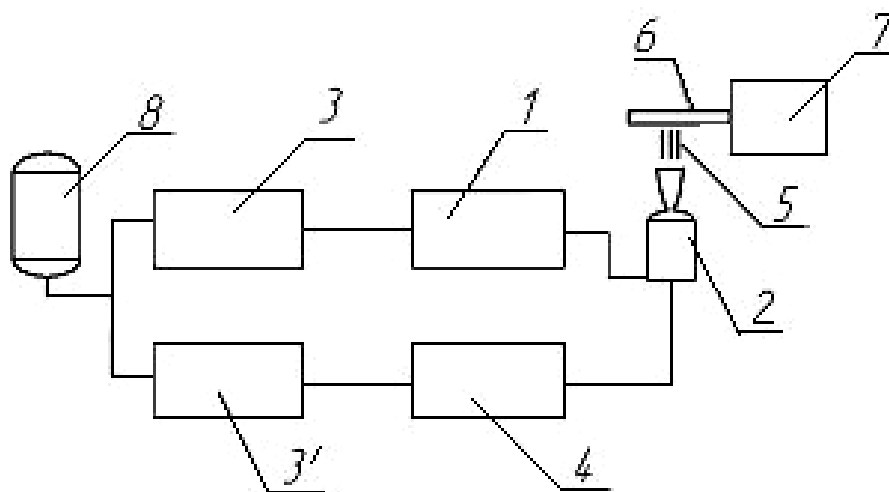


Рисунок 2.1 Блок-схема установки реализации НТГДМ-технологии.

Изначально сжатый воздух нагнетается в баллон 8. Далее система управления расходом газа некоторое количество воздуха направляет в подсистему дозирования порошка 3. Именно здесь формируется газопорошковая взвесь, с требуемым расходом порошка. Далее – камера смешивания 2. Остальная часть воздуха с параметрами на регуляторе 3',

направляется в омический нагреватель газа 4, чтобы достичь нужной температуры. В нагретом состоянии газ направляется в 2, и потом выполняет роль газа-носителя порошка.

После чего полученная гетерогенная смесь поступает в разгонный сопловой блок (ускоритель), создающий сверхзвуковую гетерогенную струю 5, которая направлена на обрабатываемую поверхность детали 6, расположенную в специальном устройстве 7 для поворота детали.

Для того или иного случая нанесения покрытия определяется режим по скорости частиц порошка – на момент контакта с материалом основы. Скорость частиц порошка в данном случае определяется температурой, а также давлением газа-носителя непосредственно в камере, где происходит смешивание.

На базе разработанной блок-схемы НТГДМ-технологии, в лаборатории МАИ создан комплекс уникальных стендов [46, 143...148], который включает в себя газодинамический стенд с системой контроля и управления и систему для диагностики параметров [16] что позволяет не только изучать основы данной технологии, но и разрабатывать на их основе промышленное оборудование.

Осуществляется постановка стендов в отдельных боксах – 1 и 6; каждый бокс имеет 2,5 метра высоту и 20 квадратных метров площади. Подобная конфигурация обеспечивает высокую эффективность обслуживания, эксплуатации боксов; повышается экономическая выгода при работе технологии.

На рисунке 2.2 показана схема научного комплекса.

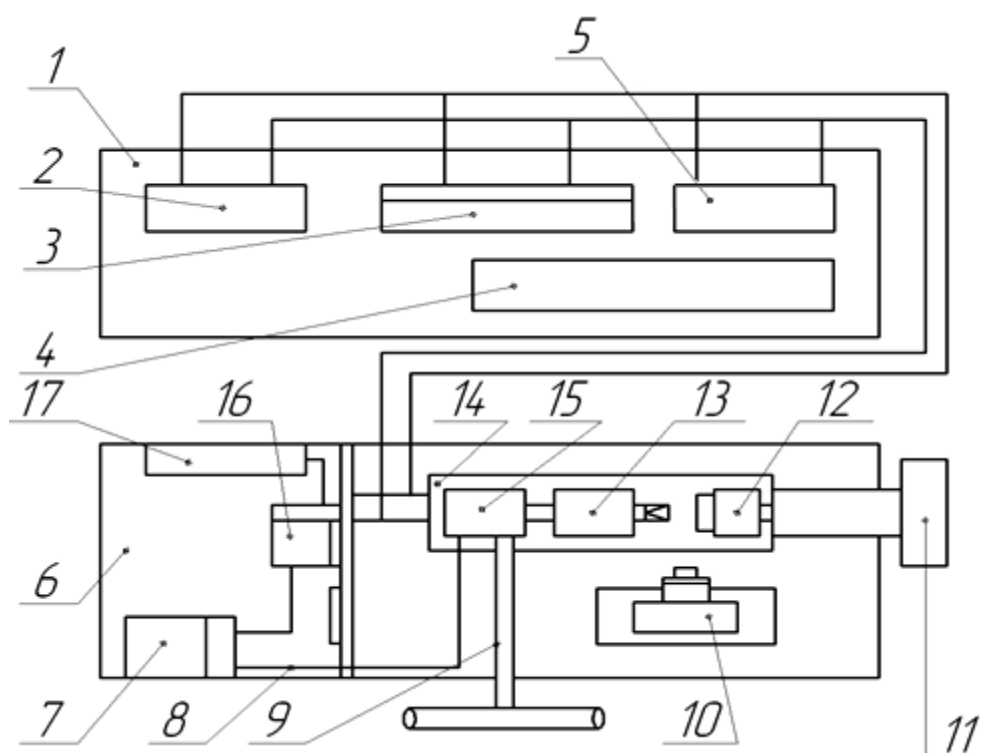


Рисунок 2.2. Блок-схема стенда.

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 вихретоковой интроскопии, которые измеряют толщину покрытий и исследуют их структуру и пористость. Эти системы, управляемые компьютерами класса PC AT и оснащенные специализированным программным обеспечением, повышают информативность исследований и способствуют оптимизации процесса нанесения покрытий.

Оборудование бокса 1 сопряжено ОВС и кабельной сетью с системами второго бокса 6. Там стоят компоненты газодинамического тракта: система

для дозирования порошка, регулирование массы использования смеси, нагрева газа-носителя 15, а также узел готовой смеси, 13 – разгонный сопловой блок, робот для манипуляций с деталью 12. Чтобы вывести остатки порошка, специально работает 11 – установка очистка газа и сбора порошка с циклоном.

Газ подается пневматической системой, которая работает от 0 стандартной пневматической магистрали высокого давления.

Как контроль, так и управление электрическим питанием стенда, контроль над расходом газа осуществляется через 16 пульт. На нем есть приборы визуального контроля, а также системы ДУ, благодаря которому работа выполняется, как в ручном, так и в автоматическом режиме. На рисунке 2.3 комплекс представлен схематически.

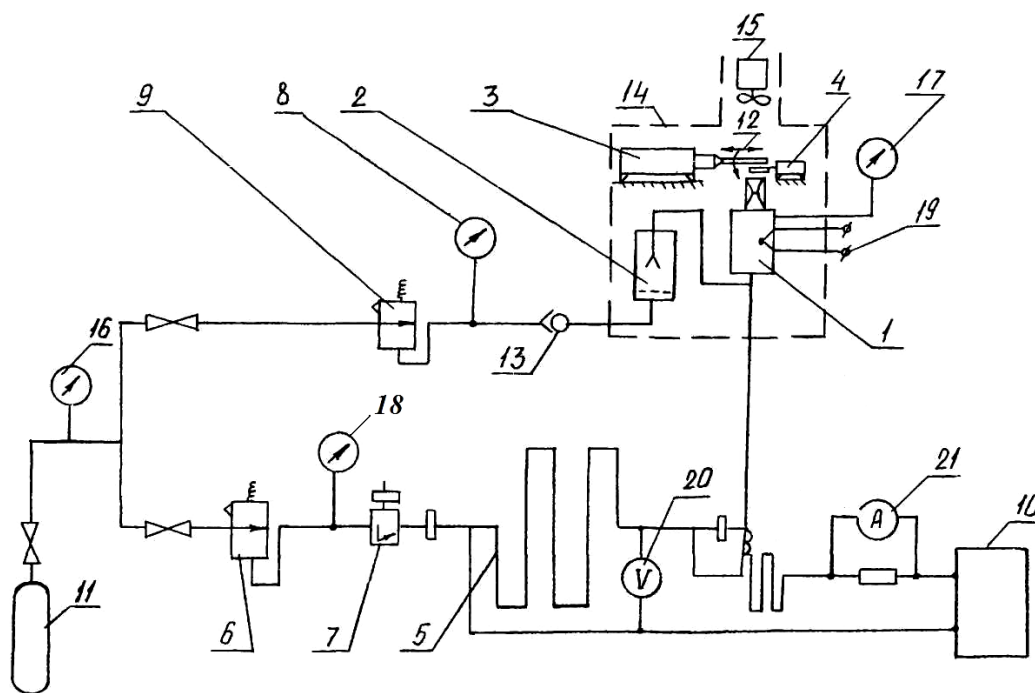


Рисунок 2.3. Схема стенда лабораторного типа.

Для управления наукоемкой технологии формирования покрытий на стенде смонтирована автоматизированная система контроля и обработки информации [16].

Отдельный блок диагностики передает данные по оптико-волоконной и кабельной сети для их последующей обработки в автоматизированной системе. Эта система оснащена подсистемой контроля и регулирования

основных параметров процесса, таких как давление, температура, расход газа и газопорошковой смеси, напряжение и ток нагревателя, скорость перемещения детали, толщину покрытия и др.

Дополнительно, система содержит подсистему сбора и обработки экспериментальных данных, что позволяет проводить экспресс-анализ и оптимизировать технологический процесс, а также улучшать прогнозируемость свойств покрытий. На дисплее компьютера отображается пневмосхема стенда, демонстрирующая ход технологического процесса и его параметры.

Компьютерные программы, такие как “Scada” и “Labtech Control”, используются для поддержания выбранного режима нанесения покрытий и обеспечивают функции выбора команд, регулирования, сбора и отображения информации.

Автономная подсистема 10, установленная в боксе стенда, включает лазерный доплеровский анемометр, видеокамеру, устройство сканирования с ПЗС-матрицами и пирометрические системы, что повышает информативность исследований процесса нанесения покрытий.

Благодаря этим технологиям, стенд позволяет получать высококачественные покрытия с прогнозируемыми свойствами, соблюдая строгие экологические стандарты производства.

Основные параметры стенда приведены в таблице 2.

Таблица 2 Основные параметры газодинамического стенда.

№	Параметр	Значение
1	Потребляемая электрическая мощность, кВт	до 1000
2	Давление газа-носителя в камере смешения, МПа	до 3,0
3	Температура газа-носителя в камере смешения, К	до 900
4	Расход газа-носителя, г/с	до 1000
5	Расход наносимого порошка, г/с	до 100
6	Толщина наносимого покрытия, мм	0,01...20
7	Скорость микрочастиц порошка в газовом потоке, м/с	до 1100
8	Скорость газа-носителя, м/с	до 1500

На базе лабораторного комплекса разработаны и апробированы оборудование и технологии для синтеза антикоррозионных покрытий из цинка, алюминия, никеля, меди и их сплавов на изделиях прокатных станов: уголок, швеллер, тавр, труба (внешняя и внутренняя поверхности) и др.

Приоритет НТГДМ и оборудования установлен экспертизой ВНИИГПЭ, выдачей десяти патентов.

2.3. Диагностика параметров сверхзвуковых гетерогенных потоков и свойств покрытий.

Для оценки влияния различных факторов на качество производимых покрытий, необходимо проведение комплексной диагностики параметров сверхзвуковых гетерогенных потоков и свойств покрытий.

Параметры сверхзвукового гетерогенного потока и характеристики синтезированных покрытий, а также методы и средства их определений, чрезвычайно разнообразны. Поэтому приведение методов и средств определения всего комплекса параметров нецелесообразно, так как данному вопросу посвящены значительное количество публикаций [45...79].

Ниже проанализированы лишь те методы и средства, которые были использованы в данной работе с целью оптимизации режимов НТГДМ-технологии и определения теплофизических свойств покрытий.

2.3.1. Применение лазерной доплеровской анемометрии для диагностики гетерогенных потоков.

Метод измерения скоростей основан на изменении частоты лазерного излучения, рассеянного частицами. [80...84].

Пусть лазерный поток, характеризуемый круговой частотой ω_0 и волновым вектором k_0 падает на движущуюся со скоростью V_p частицу и рассеивается от её поверхности в пространство. Рассеянная волна определена волновым вектором k_p и частотой ω_p . Тогда, согласно эффекту Доплера, имеем:

$$\omega_p = \omega_0 + V_p(k_p - k_0) \quad (2.1)$$

Разность частот падающей и отраженной волн ($\omega_p - \omega_0$), называемая доплеровским сдвигом, содержит информацию о проекции вектора скорости V_p на разностный вектор $k = k_p - k_0$, который зависит от длины волны падающего излучения λ_0 и угла α между векторами k_p и k_0 . Скорость частицы определяется по формуле:

$$V_p \cdot \cos\varphi = f_D \cdot \frac{\lambda}{2\sin\alpha} \quad (2.2)$$

где $f_D = \omega_0/2\pi$, φ - угол между направлением луча и вектором движения частицы. При исследовании двухфазных потоков применяются дифференциальные схемы лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС). В этом случае на движущуюся частицу направляются два лазерных пучка, тогда разностная частота между отраженными сигналами определяется из выражения:

$$\omega_D = \omega_{1,p} - \omega_{2,p} = V_p(k_{1,0} - k_{2,0}) \quad (2.3)$$

При падении на движущуюся частицу двух лазерных пучков, разностная частота между отраженными сигналами ω_D не зависит от направления наблюдения рассеянного излучения. Тогда имеем:

$$f_D = \omega_0/2\pi = \frac{2V_p}{\lambda_0 \sin \theta/2}, \quad (2.4)$$

где θ - угол между зондирующими пучками 1 и 2.

Для диагностики двухфазных потоков применялся дифференциальный лазерный доплеровский анемометр марки LDV TSI со встроенной системой PDP-11/23. Его принципиальная схема приведена на рис 2.4.

Источником излучения в комплексе ЛДИС является лазер 1. Исходный лазерный поток излучения делится расщепителем 2 на два пучка приблизительно равной мощности, которые с помощью блоков передающей оптической системы 3' и 3'' направляются и фокусируются в исследуемом сечении гетерогенного потока 4. Рассеянное частицами от двух зондирующих пучков излучение собирается приемной оптической системой 5 и направляется в фотоприемник 7. Один из пучков, для выравнивания оптических путей, проходит линию задержки 9. Однополосный модулятор 10 сдвигает частоту лазера ν_0 на частоту ν_m . В фотоприемнике 7 происходит суммирование рассеянного излучения от первого и второго пучков. Далее фотоприёмник передаёт сигнал на электронный процессор 8. Вектор чувствительности направлен по вертикальной оси.

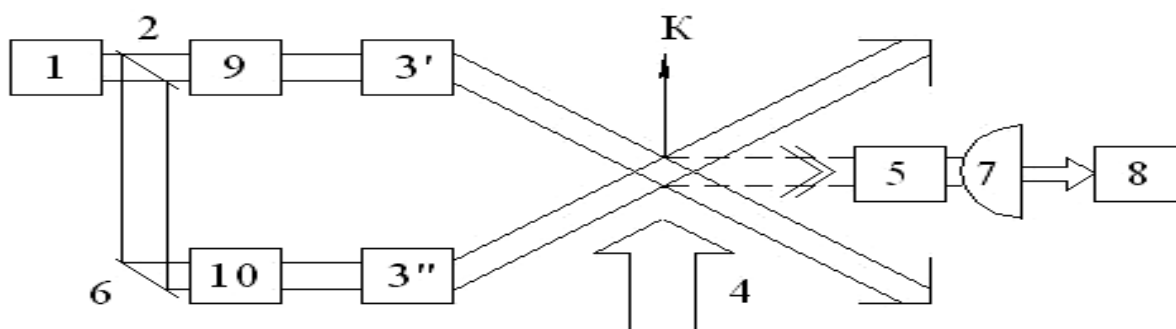


Рис.2.4. Блок-схема дифференциального лазерного доплеровского измерителя скорости частиц.

Исследование рассеянного излучения в гетерогенных потоках действительно представляет собой сложную задачу из-за присутствия частиц различного размера. Односторонние схемы измерения могут быть неэффективными для крупных частиц с асимметричной индикатрисой рассеяния, требующих более мощных лазеров для получения достаточного сигнала.

Скорость скольжения частиц — ключевой параметр в таких потоках, который определяется как разность скоростей газа и частиц. Точное измерение

этой разности имеет решающее значение, поскольку даже небольшие ошибки могут привести к значительным погрешностям при высоких абсолютных скоростях газа.

Лазерная доплеровская анемометрия предлагает решение этой проблемы, позволяя непосредственно измерять скорость скольжения. В гетерогенном потоке, содержащем как крупные, так и мелкие частицы, мелкие частицы достигают скорости, близкой к скорости газа, что позволяет разделить доплеровский сигнал на две составляющие. Эти составляющие соответствуют скоростям мелких и крупных частиц, а их частотные разности дают информацию о скорости скольжения крупных частиц.

2.3.2. Определение плотности теплового потока.

Экспериментальное определение плотности конвективного теплового потока является важным аспектом при исследовании НТГДМ-технологии. Две основные цели этого исследования:

Изучение баланса энергии частиц при их взаимодействии с подложкой, что критически важно для понимания процессов, происходящих в зоне удара.

Определение теплофизических свойств термостойких покрытий при их воздействии высокотемпературными газовыми потоками, что особенно актуально для элементов, эксплуатируемых в условиях высоких температурных нагрузок.

Калориметрические методы, используемые для определения плотности конвективного теплового потока, обычно применяются при реализации теплообмена регулярного режима первого рода [46]. Это означает, что теплообмен происходит при стационарных условиях, и тепловой поток не изменяется со временем.

Калориметры регулярного режима бывают двух типов:

- "Стержневые" калориметры, где теплоприемный элемент имеет форму стержня.
- Таблеточные калориметры, где теплоприемный элемент имеет форму плоской таблетки.

Оба типа калориметров не охлаждаются и предназначены для измерения тепловых потоков без отвода тепла, что позволяет более точно определить величину конвективного теплового потока, воздействующего на исследуемую поверхность. Эти данные критически важны для понимания процессов теплообмена и оптимизации технологических параметров НТГДМ-покрытий.

Известно о том, что в стержневом калориметре теплоприемником является теплоизолированный с боков стержень, который имеет так называемую «бесконечную длину», с электролитической меди, как показано на рисунке 2.5 [47].

Метод предусматривает применение постоянного режима нестационарной теплопроводности, когда коэффициент отдачи тепла и температура приходящего потока – не меняются. В таком случае плотность теплового потока в калориметре определяется по закону Фурье:

$$q_0 = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (2.5)$$

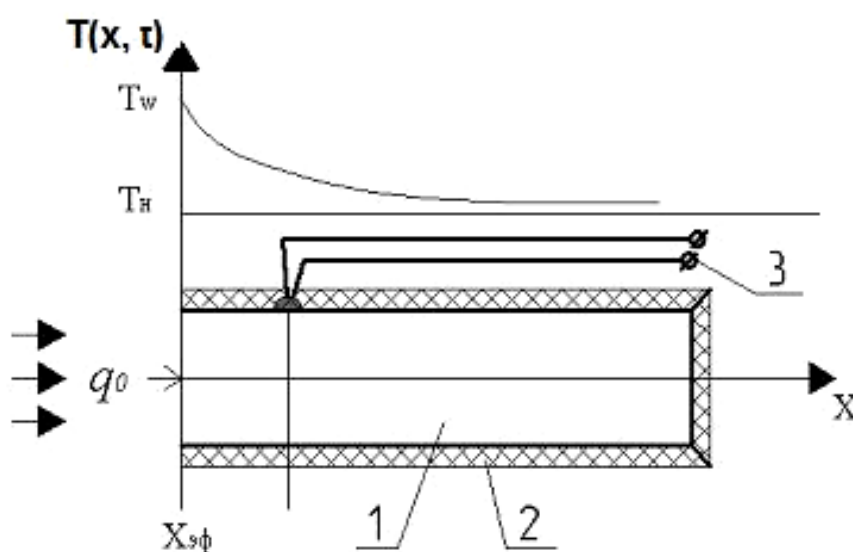


Рисунок 2.5. Схема калориметра «стержневого» типа.

1- теплоприемный элемент, 2- теплоизоляция, 3- термопара

В калориметре в качестве теплоприемного элемента используется тело классической формы, что позволяет задачу нестационарной теплопроводности в объеме тела свести к задаче в одномерной постановке. При этом тепловой поток q_0 от гетерогенной струи должен поступать в стержень через его

торцевую поверхность и распространялся вдоль оси. С этой целью боковая поверхность стержня теплоизолируется.

По определению, в уравнении (2.5)

$$\text{grad } T = \frac{dT(x, \tau)}{dx}, \quad (2.6)$$

В данном случае $dT(x, \tau)$ является функцией, на основании которой распределяется температура по протяженности теплоизолированного стержня с учетом временного промежутка. Чтобы найти данную функцию, нужно решить дифференциальное уравнение теплопроводности; при такой постановке задачи его вид будет следующим:

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = a \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.7)$$

где $a = \lambda/\rho c$ коэффициент температуропроводности материала стержня.

Дифференциальное уравнение (2.7) решается при следующих условиях:

- начальные условия:

$$T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{\text{нач}}, \quad (2.8)$$

- граничные условия:

$$T(x, \tau)|_{\tau=\tau_1} = T_w, \quad (2.9)$$

Решение уравнения (2.7) при условиях (2.8) и (2.9) проводится методом операционного исчисления [85]. В результате имеем:

$$T(x, \tau) - T_{\text{нач}} = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau_{\text{экс}}} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}}} \right), \quad (2.10)$$

Преобразовав (2.10), получаем уравнение для расчета плотности теплового потока с использованием данных стержневого калориметра:

$$q_0 = \frac{\lambda[T(x, \tau) - T_{\text{нач}}]}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}}} \right)}, \quad (2.11)$$

где $\tau_{\text{экс}}$ время эксперимента, то есть время экспозиции теплового потока на теплоприемный элемент калориметра.

$$\text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau_{\text{экс}}}\right) - \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}}}, \quad (2.12)$$

где $\text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}}}\right)$ - функция, получаемая в результате интегрирования функции ошибок Гаусса.

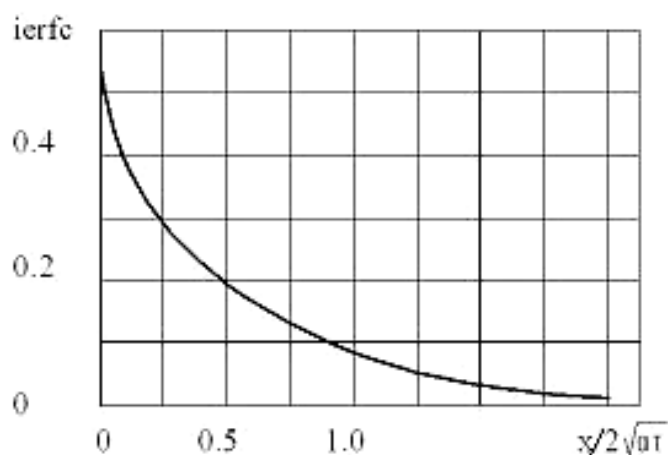


Рисунок 2.6. Функция $\text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{экс}}}}\right)$.

Значение функции отражено на графике рисунка 2.6 [109]; x является координатой на длине стержня, куда помещается термопара для определения изменений температуры в сечении стержня, с учетом времени.

Для определения q_0 , по формуле 2.11, необходимо знать теплофизические свойства материала стержня, расстояние по длине стержня от тепловоспринимающей поверхности до места нахождения термопары x , а также зависимость температуры от времени.

Для калориметра таблеточного типа теплоприемным элементом является таблетка, толщиной δ .

Работа калориметра "таблеточного" типа основана на первом законе термодинамики [47]. В данном случае процесс теплообмена между набегающим потоком и калориметром организован так, что вся теплота, подведенная к теплоприемному элементу калориметра известной массы и геометрической формы, затрачивается на изменение его энтальпии, т. е:

$$Q = \Delta I \text{ или } Q = \bar{c} \cdot m \frac{d\bar{T}(x, \tau)}{d\tau} \Delta\tau, \quad (2.13)$$

тут m является массой приемника калориметра;

$\bar{c}$ – показатель удельной теплоемкости материала на теплоприемном компоненте калориметра; величина получена с учетом среднемассовой температуры $\bar{T}(\tau)$, $\Delta\tau$ – экспозиция по времени набегающего потока на калориметр.

Чтобы 2.13 трансформировать к виду, удобному для расчета, предстоит подобрать форму теплоприемного компонента; например, она может быть такой, чтобы используемая теплота для нагревания передавалась через расчетную площадь F теплоприемного элемент. В то же время важно отметить, что расчетная поверхность точно должна определять объем теплоприемника, то есть, чтобы в 2.13 масса тела была представлена в таком виде, как:

$$m = F \cdot \delta \cdot \rho, \quad (2.13)$$

ρ - плотность, F - площадь поверхности, воспринимающей теплоту, δ - толщина элемента (рисунок 2.7). Понятно, что форма теплоприемного элемента, удовлетворяющая всем указанным выше требованиям, таблетка.

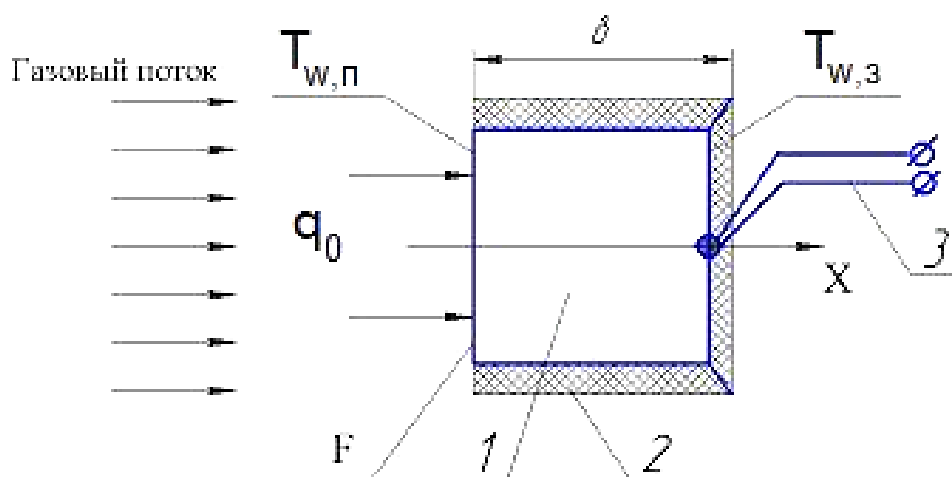


Рисунок 2.7. Схема калориметра «таблеточного» типа.

1- теплоприемный элемент, 2- теплоизоляция, 3 - термопара, q_0 – плотность теплового потока, $T_{w, п}$ и $T_{w, з}$ - температура передней и задней поверхностей, соответственно, F - площадь поверхности, воспринимающая теплоту

В таком случае имеем, что плотность потока тепла, что направляется на нагревание теплоприемного компонента от $T_{\text{нач}}$ до температуры T_{τ} отражается в виде:

$$q = \frac{Q}{F \cdot \Delta\tau} = \rho \cdot c \cdot \delta \frac{\bar{T}_{\text{таб},1} - \bar{T}_{\text{таб},2}}{\Delta\tau}, \quad (2.14)$$

где $\bar{T}_{\text{таб},2}$ - среднемассовая температура таблетки в момент времени τ_2 , а $\bar{T}_{\text{таб},1}$ - среднемассовая температура таблетки в момент времени τ_1 . Среднемассовые температуры рассчитываются с использованием известной формулы:

$$\bar{T}_i(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_1(x, \tau) dx, \quad (2.15)$$

Калориметры «стержневого» и «таблеточного» типа изображены на рисунке 2.8.



Рис. 2.8. Неохлаждаемые калориметры.

«стержневой» (слева), «таблеточный» (справа)

В эксперименте калориметр устанавливается на некотором расстоянии L от среза сопла в сечении гетерогенного или гомогенного потока, в котором необходимо определить плотность теплового потока q в стенку калориметра (рисунок 2.9).

Автоматизированная система регистрирует сигнал термопары 5 и на дисплее выводится термограмма в виде зависимости $T = f(x)$. Данные

калориметра и термограммы обрабатываются по соответствующему алгоритму [47,71].

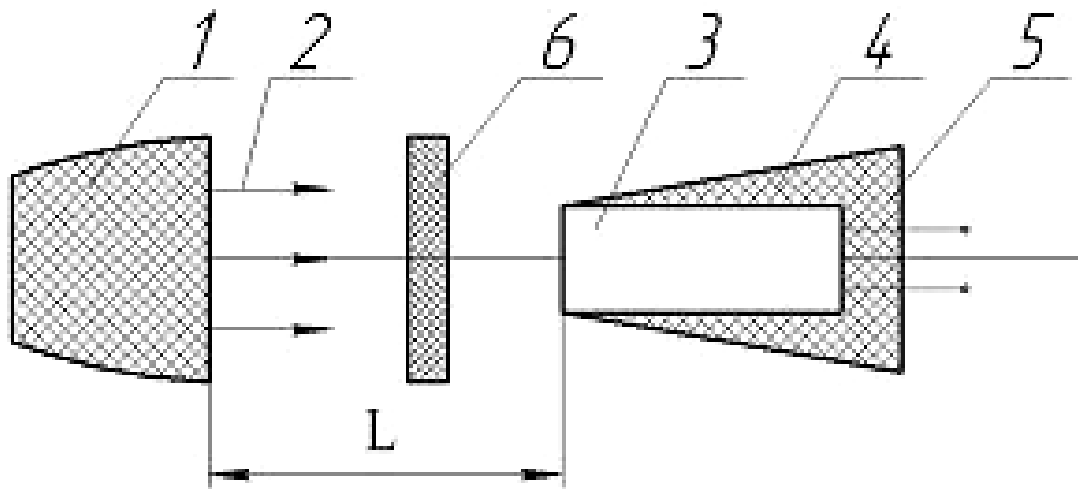


Рисунок 2.9. Схема расположения калориметра при определении плотности теплового потока в гетерогенном потоке.

1- сопло, 2- сверхзвуковой поток, 3- калориметр, 4 - державка калориметра (теплоизолятор), 5- термопара калориметра, 6 - шторка

Значение относительной суммарной квадратичной погрешности определения тепловых потоков рассчитывается по формуле (2.16).

$$\frac{\Delta q}{q_0} = \pm \left[\Delta \left(\frac{d\bar{T}_k}{d\tau} \right)^2 + \Delta \left(\frac{\Delta \bar{T}_{\tau,k}}{T_{\tau,k}} \right)^2 + \Delta \left(\frac{\Delta q_{0,\text{пот}}}{q_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.16)$$

где q_0 определяемая плотность теплового потока в приемный элемент калориметра, $\Delta \left(\frac{\Delta q_{0,\text{пот}}}{q_0} \right)$ - неучтенные потери тепла в калориметре, $\Delta \left(\frac{\Delta \bar{T}_{\tau,k}}{T_{\tau,k}} \right)$ - погрешность, обусловленная термической (температурной) инерцией термопары теплоприемного элемента калориметра, $\Delta \left(\frac{d\bar{T}_k}{d\tau} \right)$ - погрешность обработки результатов измерений.

2.3.3. Определение температуры поверхности покрытия в процессе нагрева.

Температура поверхности подложки и частиц, формирующих покрытие, играет ключевую роль в определении свойств таких покрытий, как адгезия, когезия и пористость. При этом, точное измерение температуры является сложной, но важной задачей.

Контактные методы измерения температуры, такие как использование термопар, являются распространенным выбором благодаря их простоте и точности. Однако, у термопар есть ограничения по максимальной измеряемой температуре, что может быть критичным при работе с высокотемпературными процессами.

Для измерения температуры поверхности в условиях высоких температур часто применяются бесконтактные методы, такие как инфракрасная термография или пирометрия. Эти методы позволяют измерять температуру на расстоянии и могут быть особенно полезны при работе с материалами, которые могут быть повреждены при контакте или, когда прямой контакт невозможен из-за высоких температур.

Известно [94], что принцип бесконтактных методов измерения температуры сильно нагретых тел, базируется на применении закона Планка. Физическая сущность методов заключается в определении энергетической яркости излучения B_λ тела на определенной длине волны λ . В таком случае, согласно закону Планка, для излучения реальных (серых) тел имеем:

$$B_\lambda = \varepsilon_\lambda B_{0,\lambda} = \varepsilon_\lambda \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{w,\lambda}}\right), \quad (2.17)$$

где B_λ и $B_{0,\lambda}$ - монохроматические яркости излучения нагретого реального тела и черного тела, соответственно, $T_{w,\lambda}$ - яркостная температура поверхности тела, ε_λ - монохроматическая степень черноты, c_1 и c_2 - постоянные излучения.

Величину истинной температуры поверхности T_w тела рассчитывают по формуле, используя значения яркостной температуры $T_{w,\lambda}$, определенную из (2.17). Имеем:

$$T_w^{-1} = T_{w,\lambda}^{-1} + \frac{\lambda}{c_w} \ln \varepsilon_\lambda, \quad (2.18)$$

При этом, следует иметь ввиду, что формула (2.17) справедлива при условии:

$$\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{w,\lambda}} \gg 1, \text{ то есть при } T_w < 3000\text{K и } \lambda < 1 \text{ мкм.}$$

На рисунке 2.10 приведена структурная схема системы измерения температуры покрытий (материалов) на экспериментальном стенде.

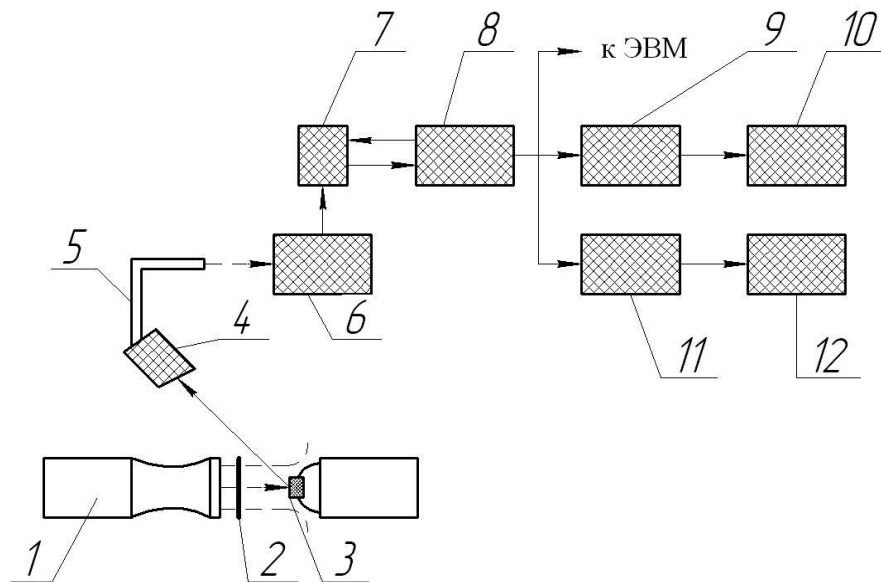


Рисунок 2.10. Блок - схема системы измерения температуры покрытия:

1- генератор сверхзвукового потока плазмотрона, 2 - шторка; 3 - образец с покрытием, 4 - оптический приемник, 5 – волоконнооптический световод, 6 - монохроматор; 7 - фотоэлектрический приемник, 8 - электронный осциллограф, 9 - аналого-цифровой преобразователь, 10- принтер, 11 - магазин сопротивлений, 12 - светолучевой осциллограф

Осциллограмма регистрации разных уровней температуры поверхности покрытий во времени $T_w(\tau)$ приведена на рисунке 2.11

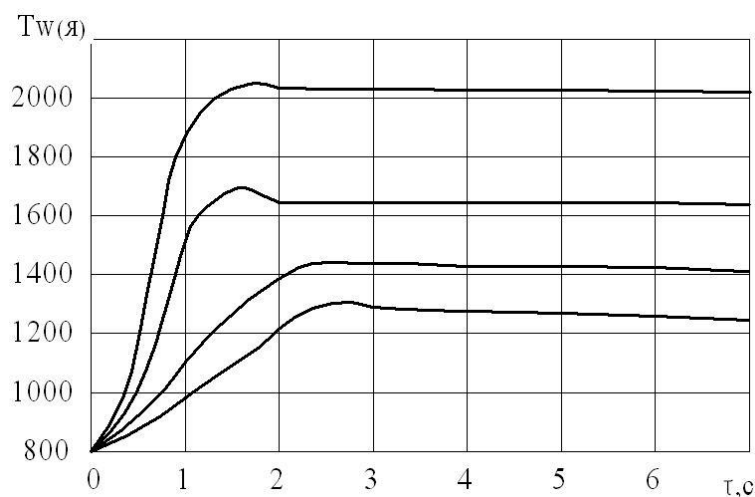


Рисунок 2.11. Осциллограмма регистрации температуры поверхности покрытий.

Полученная таким образом осциллограмма обрабатывается, и далее, используя выражение (2.18), определяется истинное значение температуры T_w при известном ϵ_λ [88].

Итак, на основании представленного комплекса для измерений можно определять, регистрировать яркостную температуру поверхности образца материала, при стационарном и нестационарном режиме работы стенда. Комплекс измерения согласован с системой, которая позволяет обрабатывать информацию в автоматическом режиме [16].

Для того чтобы определить среднеквадратичную погрешность изменения температуры на поверхности, на стенде применяют метрологические требования расчета; задействовано соотношение, представленное далее [59, 62]:

$$\overline{\sigma}(\Delta T_w) = \pm (\Delta T_{гр}^2 + \Delta T_{обр}^2 + \Delta T_\lambda^2 + \Delta T_\epsilon^2 + \Delta T_\Phi^2)^{1/2}, \quad (2.19)$$

где Δ выступает в качестве погрешности градуировки; $\Delta T_{обр}$ - погрешность обработки осциллограммы, ΔT_λ - погрешность определения длины волны монохроматора (пирометра), ΔT_ϵ погрешность определения степени черноты ϵ_λ поверхности, ΔT_Φ погрешность пирометрического ослабления яркости излучения нейтральным фильтром.

2.3.4. Определение степени черноты покрытия

При проведении исследований применялся экспериментальный метод определения степени черноты покрытия [141]. Метод основан на использовании закона лучистого теплообмена Стефана – Больцмана между двумя поверхностями, в виде [94].

$$Q_{\text{луч}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_0 \cdot F_1 \left[\left(\frac{T_{w,1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w,2}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.20)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенный коэффициент черноты, равный:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (2.21)$$

где F_1 – является площадью поверхности излучающего тела 1, как показано на рисунке 2.12. Температура $T_{w,1}$, степень черноты ε_1 , F_2 – площадь 2 поверхности тела, где наблюдается восприятие теплового лучистого потока с $T_{w,2}$ и степенью черноты ε_2 , c_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Соответственно, на основании (2.20) и (2.21) не составит труда найти $\varepsilon_{\text{пр}}$ с учетом известных ε_1 , F_1 , F_2 , $Q_{\text{луч}}$, T_{w1} и T_{w2} . В комплексе, чтобы решить поставленную задачу, предстоит создать установку, где посредством систем измерения находятся заданные параметры. На рисунке 2.12 показана схема установки.

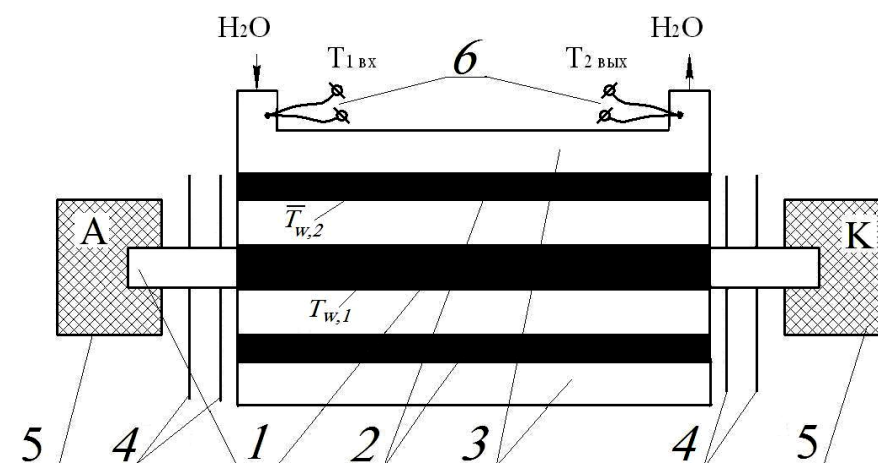


Рисунок 2.12. Схема установки для определения коэффициента черноты покрытия $\epsilon_{\text{покр}}$.

1- исследуемый образец с покрытием, 2- стенка черного тела, 3 - водяной калориметр, 4 - экраны для блокировки излучения, 5- электроды источника питания, 6 - термопары водяного калориметра, А – анод, К – катод, $T_{1 \text{ ВХ}}$ – температура воды на входе в калориметр, $T_{2 \text{ ВЫХ}}$ - температура воды на выходе из калориметра, $T_{w,1}$ - температура поверхности исследуемого образца, $\bar{T}_{w,2}$ - средняя температура поверхности черного тела.

Но метод, который представлен выше, можно существенно упростить, если тело, излучающее энергию 1, поместить в черное тело 2. В таком случае 2.21 – выражение, что упрощается до вида:

$$\epsilon_{\text{пр}} = \epsilon_1, \quad (2.22)$$

С использованием (2.22), выражение (2.20) принимает вид:

$$Q_{\text{луч}} = \epsilon_1 \cdot c_0 \cdot F_1 \left[\left(\frac{T_{w,1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w,2}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.23)$$

1 – это образец, который выполняется в виде трубки с тонкими стенками, с жаропрочного материала. На бок трубки наносится термостойкий материал. Уровень его черноты ϵ_w предстоит определить.

Итак, образец помещается на оси водяного калориметра 2. Поверхность 2 его имеет $\epsilon_1 = \sim 1$. Наш образец подключается к электродам 5. Торцы водяного калориметра 2 закрываются экранами 4, с зеркально отраженной

поверхностью. Чтобы получить $\varepsilon_1 = \sim 1$, нужно внутреннюю стенку водяного калориметра 2 покрыть тонким слоем сажи полиметилметакрилата. В 0.2-0,3 мм такой слой имеет черноту $\varepsilon_1 = \sim 0,99$. Термопары 6 применяются для того, чтобы определить на входе и выходе с водяного калориметра температуру воды.

Эксперимент с описанным устройством, оснащенным измерительными приборами, проводится в вакуумной камере с давлением ($P_{\text{вак}} < 10^{-3}$ мм рт. ст.).

2.3.5. Испытание термостойких покрытий в высокотемпературных потоках.

Методика проведения огневых испытаний термостойких покрытий в высокотемпературных потоках однозначно определяется назначением исследуемого покрытия, а также целью проводимых испытаний. В ряде случаев ставятся эксперименты, целью которых является определение конкретных характеристик покрытия таких, как проницаемость, стойкость к «термическому удару», термостойкость и др.

Таким образом, от того, какие характеристики покрытия необходимо исследовать в эксперименте, зависит форма образца и его расположение в потоке.

Для проведения испытаний термостойкости покрытий в высокотемпературном потоке была создана экспериментальная установка на базе генератора плазмы с дуговым разрядом, стабилизированным вихрем воды. На установке воспроизводятся примерно такие рабочие условия для покрытий, какие реализуются в камерах сгорания криогенных кислородо-водородных ЖРД. Схема установки приведена на рисунке 2.14. При этом, в зависимости от задач эксперимента, использовались различные модели с покрытиями. Например, конусная державка для образца цилиндрической формы, плоские модели установленные перпендикулярно оси потока (рисунок 2.14 а) или под углом атаки к потоку (рисунок 2.14 б).

Схемы конструкции охлаждаемых моделей приведены на рисунке 2.13. Основная особенность данных моделей заключается в том, что они могут охлаждаться либо водой, либо криогенной жидкостью, например, жидким азотом. Эта особенность позволяет в процессе эксперимента воспроизвести не только реальные тепловое и химическое воздействие, но и реализовать необходимые градиенты температуры по толщине покрытия, то есть достигнуть соответствия натурным условиям эксплуатации покрытий в криогенных ЖРД.

Методика огневых испытаний включает также методику определения температуры поверхности покрытия при его нагреве в кислородо-водородном потоке. Методика предусматривает измерение температуры двух поверхностей образца: наружной поверхности (покрытия), омываемой высокотемпературным потоком и внутренней, противоположной поверхности.

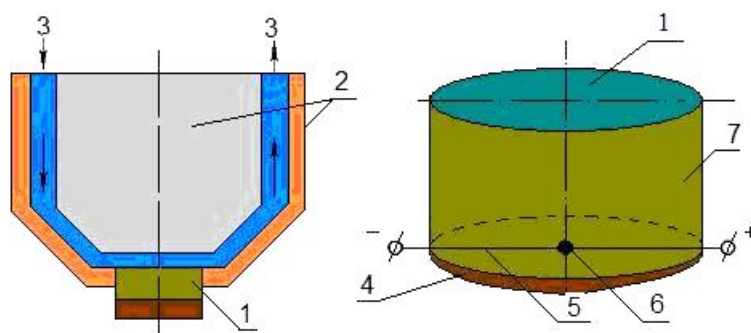


Рисунок 2.13 Схемы цилиндрической охлаждаемой модели:

1- цилиндрический образец с покрытием, 2- корпус охлаждаемой модели, 3 - охладитель, 4- термостойкое покрытие, 5-термопара, 6 – королектермопары, 7 - корпус образца.

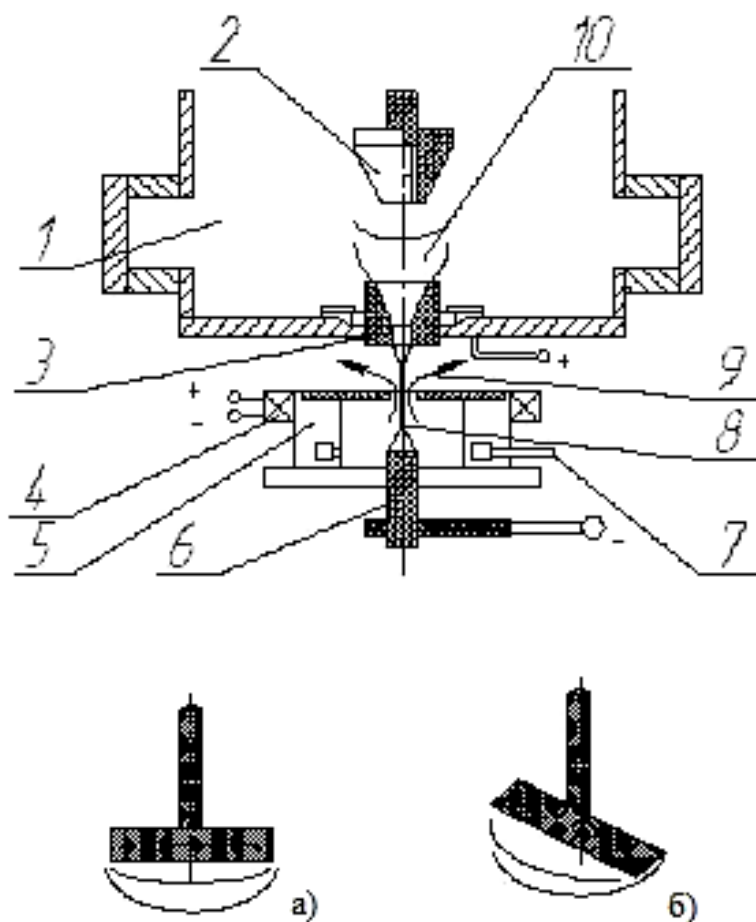


Рисунок 2.14. Схема экспериментальной установки и типы исследуемых моделей. 1 - рабочая камера стенда с плазмотроном, 2 - модель с цилиндрическим образцом, 3 - сопло –анод, 4 - магнитная катушка, 5- корпус плазмотрона; 6- катод, 7 - подача воды, 8- электрическая дуга, 9 - вихревой слив воды, 10- высокотемпературный газовый поток, а и б- плоские модели

Температура внутренней поверхности измеряется, как правило, с помощью хромель - алюмелевой термопары.

Температура наружной поверхности может определяться двумя методами:

методом электронно-оптической пирометрии с регистрацией показаний пирометра либо на осциллографе, либо на дисплее компьютера.

расчетным методом с использованием данных по измерению температуры задней поверхности образца и измерению теплового потока с помощью калориметра:

$$q_w = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (2.24)$$

где q_w - плотность теплового потока, измеренная при калориметрировании набегающего газового потока, T_{w1} - искомая температура, температура наружной поверхности покрытия, T_{w2} - температура внутренней поверхности образца, δ_1, δ_2 - толщина покрытия и толщина образца без покрытия, соответственно, λ_1, λ_2 - коэффициенты теплопроводности материалов покрытия и образца, соответственно.

В качестве дублирующего метода определения температуры наружной поверхности используется термопара, королек (спай) которой «зачеканен» на внешней поверхности модели с выводом проводников термопары наружу через сквозное отверстие в стенке образца. Результаты испытаний термостойких покрытий с использованием дублирующего метода приведены в последующих разделах работы.

Выводы по главе 2

проведён анализ физической сущности НТГДМ-технологии. На основании результатов анализа составлена принципиальная схема установки лабораторного типа с широким диапазоном параметров.

представлены методики диагностики параметров сверхзвуковых двухфазных потоков и исследования механических и теплофизических характеристик разнофункциональных покрытий:

методика определения скорости частиц с применением лазерного доплеровского измерителя скорости;

методика определения температуры поверхности покрытий в процессе их исследований в высокотемпературных газовых потоках;

методика определения интегральной степени черноты покрытий

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ.

В процессе создания защитного слоя с применением сверхзвукового потока, колоссальное значение имеют некоторые параметры: температура частиц, скорость частиц твердой фазы, местная температура подложки на месте удара.

Для контроля таких величин разработаны методы и средства экспериментального определения параметров гетерогенных потоков, которые были описаны в главе 2. К сожалению, не всегда возможно использование дорогого оборудования для определения характеристик гетерогенного сверхзвукового потока. В следствии чего, в технологическом процессе широко используют численные методы определения параметров двухфазного потока.

Уровень характеристик, описанных выше, формируется по всей длине газодинамического тракта стенда, от дозатора порошка до сверхзвукового ускорителя, в котором гетерогенный поток приобретает потребную скорость. Следует заметить, что, скорость, температура твердой и газовой фазы значительно различаются вдоль всего канала [91].

Таким образом, изучение процесса формирования покрытий газодинамическими методами связано с решением как газодинамической задачи, так и задачи межфазного теплообмена. Отмеченное определяет наукоемкость газодинамических методов.

3.1. Математическая модель одномерного течения при наличии межфазного теплообмена.

В рамках настоящего исследования под понятием «гетерогенная смесь» рассматривается двухфазная газопорошковая смесь. Характерна она тем, что в концентрации газовые фазы достигают 90%. Планируется, что полидисперсность частиц порошка составляет от 2 до 20 мкм, так называемый «субмикронный диапазон».

Принимая во внимание такую массовую концентрацию фаз в газовом потоке, в ускорителе течение подчиняется основным положениям механики, что свойственно для сплошной среды. Что касается субмикронных частиц, то они перемещаются струйками тока в ускорителе газового потока [91].

В первом приближении при проработке математической модели считали, что течение газовой фазы в ускорителе будет одномерное, изоэнтропическое, не вязкое. В таком случае размеры ускорителя, распределение скорости по длине можно описать на основании уравнения термодинамики и газодинамики (под идеальный газ):

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

$$m_{газ} = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} F_{кр} \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad (3.1)$$

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

$$\frac{F(x)}{F_{кр}} = \frac{1}{M(x)} \left\{ \left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} [M(x)]^2 \right) \right\}^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (3.2)$$

В процессе определения одномерного протекания гетерогенной смеси в ускорителе, принимая во внимание вязкость газа-носителя, применяется математическая модель. Ее основой стала база уравнений Навье-Стокса. Уравнение для одномерного стационарного течения каждой из фаз при следующих допущениях:

- фазы гетерогенной смеси локально однородные;
- без межфазовых превращений;
- без взаимодействия между частицами;
- без деления частиц и их коагуляции;
- 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:

$$\frac{\partial(c_i \cdot \rho_i \cdot u_i)}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

- уравнение движения:

$$c_i \rho_i u_i \frac{du_i}{dx} = - \frac{d(c_i p)}{dx} + R_{i \text{ аэр.}} \quad (3.4)$$

В данном случае для газовой фазы $u_i = u(x)$; в то время, как для твердой фазы $u_i = V_p(x)$, $R_{i \text{ аэр.}}$ – усилие аэродинамического сопротивления при межфазовом взаимодействии; описать величину можно соотношением:

$$R_{i \text{ аэр.}} = C_{\text{аэр}} \frac{\rho_i(x)_{\text{газ}} [u(x) - V_p(x)]^2}{2} \cdot f_{\text{мид}} \cdot n \quad (3.5)$$

где $\rho_i(x)_{\text{газ}}$ – параметр трансформации плотности газа с учетом длины ускорителя; $f_{\text{мид}}$ – величина площади миделева сечения частицы; n – количество частиц в определенном объеме.

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

где d_p – параметр, указывающий на 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]:

$$c_i \cdot \rho_i \cdot u_i \frac{d}{dx} \left(\frac{u_i^2}{2} \right) = - \frac{\partial(c_i \cdot p \cdot u_i)}{\partial x} + Q_{i \text{ кон.}} \quad (3.6)$$

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:

$$Q_{\text{кон.}} = \alpha(x) [T(x)_{\text{газ}} - T(x)_p] \cdot f_p \cdot n \quad (3.7)$$

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 $f_p = \pi d_p^2$.

Описанная выше система уравнений решается при помощи итерационного метода с использованием ЭВМ.

3.2. Алгоритм расчета математической модели одномерного течения при наличии межфазного теплообмена.

В рамках данного исследования было предложено использовать упрощенный алгоритм для расчета протекания гетерогенной смеси по каналам, при наличии межфазного теплообмена. Величина основана на использовании тривиальных программ, с учетом количественного расчета.

Упрощенный алгоритм расчета основан на применении интегральных соотношений 2-го закона механики Ньютона. Уже в постановке задачи такие соотношения правильно будет применять только тогда, когда сила, воздействующая на тело с определенной массой, будет неизменной 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 $R_{\text{аэр}}$, образуется при взаимодействии частицы и высокоскоростных потоков газа-носителя.

Ранее в работе было сказано о том, что внутри газодинамического ускорителя стенда протекает градиентное течение. Вот почему аэродинамическая сила не будет неизменной. Итак, чтобы выполнить условие, длину газодинамического тракта нужно разделить на n_i простейших участков с длиной L_i ; на каждом таком участке сила будет постоянной величиной.

Мы представили концепцию, на базе которой выстраивается упрощенный алгоритм расчета газодинамической задачи протекания гетерогенной смеси внутри ускорителя. В расчете конечный итог – изменение скорости газовой фазы $u_{\text{газ}}(x)$, а также скорости частиц $V_p(x)$ на длине каждого из n_i элементов конструкции газодинамического тракта стенда.

3.2.1. Расчёт кинематики частицы в газодинамическом ускорителе

Допускаем для расчета, что частица, вносимая в поток газа-носителя, будет ускоряться только под воздействием аэродинамической силы $R_{\text{аэр}}$ (3.5).

Расчёт кинематики частицы включает:

- расчёт ускорения $a_{p,i}$ частицы на каждом i – ом участке элемента ускорителя:

$$a_{p,i} = \frac{R_{\text{аэр.}}}{m_p} \quad (3.8)$$

где m_p масса частицы для сферических тел $m_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot \rho_p$;

- расчёт времени пролёта τ_i частицей каждого расчётного участка:

$$L_i = V_{p,i-1} \cdot \tau_i + \frac{a_{p,i} \cdot \tau_i^2}{2} \quad (3.9)$$

где $V_{p,i-1}$ - скорость частицы на входе в расчетный участок

- расчёт скорости частицы $V_{p,i}$ в конце каждого участка.

$$V_{p,i} = V_{p,i-1} + a_p \tau_i \quad (3.10)$$

Расчет повторяется для каждого i -го расчетного участка газодинамического тракта.

3.2.2. Расчет межфазного теплообмена в гетерогенном потоке.

Для того чтобы практически решить задачу теплообмена между твердой и газовой фазой, нужно рассчитать температуру частиц $T_{\text{час}}$, в момент, когда частица бьется об поверхность [130].

Алгоритм расчета теплообмена в неизотермической, движущейся гетерогенной среде основывается на первом законе термодинамики – для термодинамического твердого тела, без учета объемных источников, устранения теплоты. По такому постулату теплота, которая подходит к телу через боковую часть, тратится на изменение энтальпии.

Так, как в НТГМ-технологии частицы не претерпевают фазовых переходов, то уравнение I закона термодинамики в интегральной форме примет вид:

$$q_{\text{кон},i} \cdot F_{\text{бок. p}} \cdot \tau_i = m_p \int_{T_{p,(i-1)}}^{T_{p,i}} c_p \cdot dT \quad (3.11)$$

где $q_{\text{кон},i}$ - величина теплового конвективного потока, что образуется на единицу боковой поверхности частицы $F_{\text{бок. p}}$ массой m_p за время τ_i пролета частицей i -го расчетного участка длиной L_i . Согласно закону конвективного теплообмена Ньютона $q_{\text{кон},i}$ представляется в виде:

$$q_{\text{кон},i} = \alpha_i \cdot (T_{\text{газ},i} - \bar{T}_{p,i}) \quad (3.12)$$

где $T_{\text{газ},i}$ - температура газа-носителя на длине расчетного i -го участка длиной L_i , $\bar{T}_{p,i}$ - средняя температура частицы на длине i -го участка, $\bar{T}_{p,i} = \frac{T_{p,i} + T_{p,(i-1)}}{2}$, α_i - коэффициент теплоотдачи на расчетном i -ом участке, $c_{p,i}$ - удельная теплоемкость материала частицы при средней температуре $\bar{T}_{p,i}$.

С учетом указанного, уравнение (3.11) принимает вид:

$$\alpha_i (T_{\text{газ},i} - \bar{T}_{p,i}) F_{\text{бок. p}} \cdot \tau_i = m_p \cdot c_{p,i} (\bar{T}_{p,i} - \bar{T}_{p,(i-1)}) \quad (3.13)$$

Из теории конвективного теплообмена [95] известно, что коэффициент теплоотдачи между газовой и твердой фазой α_i можно определить из соотношения критерия Нуссельта, т.е.:

$$\alpha_i = \frac{Nu_{\text{газ},i} \cdot \lambda_{\text{газ},i}}{d_{\text{час}}} \quad (3.14)$$

В свою очередь, критерий $Nu_{\text{газ},i}$ представляется критериальным соотношением типа [92]:

$$Nu_{w, \text{газ}, i} = 2 + 0,03Re_{w,i}^{0,54}Pr_{w,i}^{0,33} + 0,35Re_{w,i}^{0,58}Pr_{w,i}^{0,356} \quad (3.15)$$

где индекс «w» означает, что для данного критерия определяющей температурой является температура частицы на расчетном i-ом участке.

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{w,i} = \frac{\rho_{\text{газ},w,i} (u_{\text{газ},i} - V_{p,i}) d_p}{\mu_{\text{газ},w,i}}$$

, здесь d_p – диаметр частицы.

Критерий Нуссельта:

$$Nu_{w,i} = \frac{\alpha_i \cdot d_p}{\lambda_{i, \text{газ}}}$$

Критерий Прандтля:

$$Pr_{w,i} = \frac{v_{w,i}}{a_{w,i}}$$

В критериальных соотношениях все параметры общеприняты.

Из (3.13) следует:

$$\bar{T}_{\text{час},i} = \frac{\alpha_i T_{\text{газ},i} \cdot F_{\text{бок}} \cdot \tau_i + m_p \cdot c_{p,i} \cdot \bar{T}_{p,(i-1)}}{\alpha_i \cdot F_{\text{бок},p} \cdot \tau_i + m_p \cdot c_{p,i}} \quad (3.16)$$

где $\bar{T}_{p,(i-1)}$ – температура частицы на предыдущем расчетном участке,

τ_i – время пролета частицей расчетного участка, рассчитывается с использованием соотношения (3.9).

Принимая во внимание тот факт, что в (3.16) параметры стоят в тесной зависимости от искомой поверхностной температуры, расчет $\bar{T}_{p,i}$ будет осуществляться методом последовательных приближений.

Итоги расчета на основе общей и предложенной упрощенной математической модели изменения скорости газа $u_{\text{газ}}$, а также V_p и температуры T_p твердой фазы по длине ускорителя. Род газовой фазы (газ-носитель) – воздух, твердая фаза – частицы Al диаметром

$d = 40$ мкм. Форма ускорителя – коническое сопло Лавалья. Результаты расчетов приведены на рисунке 3.1.

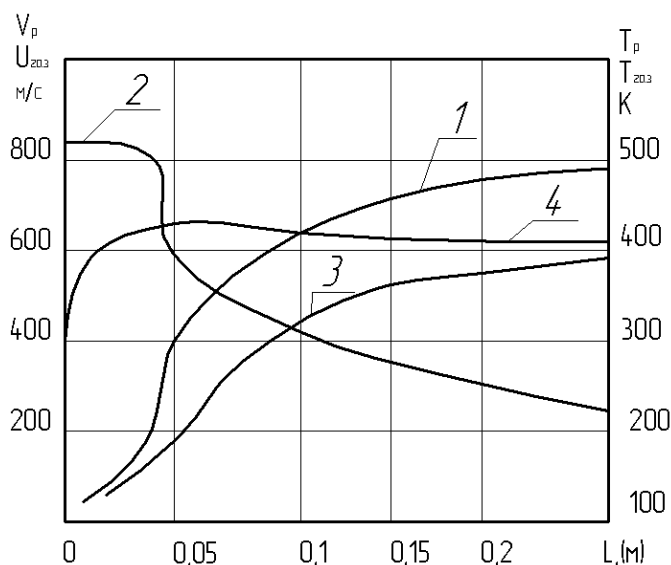


Рисунок 3.1 Сравнение данных расчета изменения скорости игаз и температуры $T_{газ}$ газового потока, а также скорости V_p и температуры T_p частицы из Al $d_p = 40$ мкм по длине ускорителя:

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

На основании данных, которые представлены выше, видим, что максимальный темп, с которым нагреваются частицы, реализуется в докритической части сопла. Это как раз зона максимальной плотности, а также температуры газа. Вместе с тем, на интенсивность нагрева частиц в докритической части сопла колоссальное воздействие оказывает тот факт, что частицы пребывают там очень долго, при малой скорости газовой фазы $U_{газ}$ и твердой V_p фаз, т.е. вследствие больших значений чисел Рейнольдса.

На рисунке 3.2 приведены результаты расчета газовой динамики и межфазного теплообмена для частиц из меди по упрощенной математической модели.

Видно, что температуры частиц диаметрами $d = 40$ мкм и $d = 20$ мкм отличаются более чем на 100 градусов (температура частиц меньшего размера меньше).

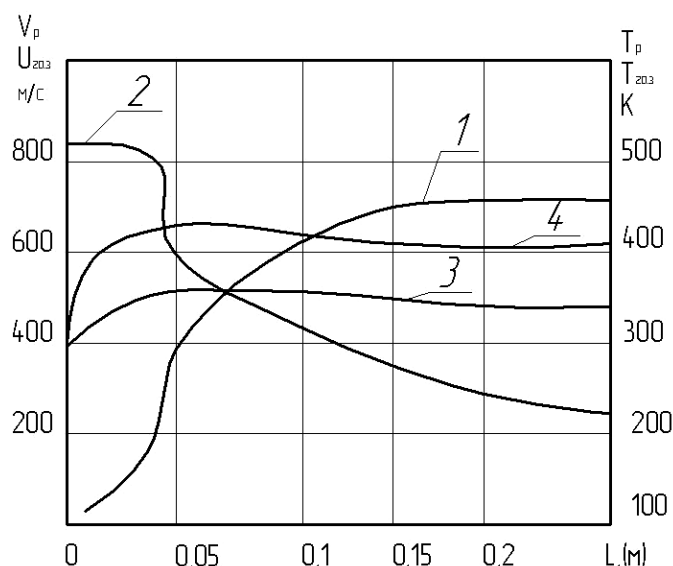


Рисунок 3.2. Изменение скорости и температуры газовой ($u_{\text{газ}}$, $T_{\text{газ}}$) и твердой фаз (V_p, T_p) по длине ускорителя: 1 – скорость газовой фазы, 2 – температура газовой фазы, 3 – температура частицы из Cu $d=20$ мкм, 4 – температура частицы из Cu $d=40$ мкм

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

При сравнении температур частиц разного рода материалов, но с одинаковыми диаметрами на рис.3.1 и 3.2, видно, что температуры частицы разнятся лишь на 20...30 градусов.

3.3. Расчёт газодинамического ускорителя гетерогенного потока с большим удлинением.

Для достижения высокого качества покрытий, формируемых высокоскоростными потоками, следует обратить внимание на следующие задачи:

- формирование течения гетерогенной смеси в микроускорителях с большим удлинением;
- взаимодействие высокоскоростной частицы порошка субмикронного диаметра с твердой поверхностью.

Решение первой задачи связано с непосредственным влиянием ускорителя на конечную скорость частиц, формирующих покрытие. Для получения покрытия с заданными свойствами ускорители должны иметь не

только расчётный профиль, но и достаточную длину для достижения необходимой скорости частиц.

Из курса газовой динамики известно: при вязком течении газа рост длины обтекаемой поверхности сопровождается увеличивающимся по толщине пограничным слоем. Применительно к рассматриваемой задаче, рост пограничного изменяет поле скоростей как поперёк, так и вдоль канала, что влияет на кинематику движения частиц в двухфазном потоке.

Принято утверждать о том, что базовая особенность протекания вязких газов в соплах с удлиненной формой состоит в том, что на стенках канала, на их поверхности образуется пограничный слой и он сильно снижает фактическое проходное сечение сопла, в сравнении с технологическим или расчетным сечением. В конечном итоге понижается секундный массовый расход потока или его скорость. В том случае, если при проектировании данных каналов не принять во внимание заданный эффект, то пограничный слой будет смыкаться внутри сопла; потом, вниз по потоку образуется установившееся течение турбулентного типа. Оно напоминает течение, которое появляется на основном участке цилиндрической гладкой трубы с существенной диссипацией потоковой энергии.

При протекании гетерогенных смесей в ускорителях с такими формами по причине небольших размеров частиц движение их вдоль каналов — прямолинейное. Образующаяся турбулентность потока, с учетом причин, о которых было сказано ранее, меняет не только характер движения частиц, но и также закон распределения скорости частиц в рамках поперечного сечения самого потока.

Добавим, что эффект диссипации энергии сильно снижает скорость частиц в сравнении с расчетной величиной. На основании многочисленных экспериментов было установлено, что скорость частиц в двухфазных потоках, которая измеряется лазерным устройством, до 50% может отличаться от тех параметров, расчет которых ведется по теории адиабатических гетерогенных сечений. Соответственно, в таком случае приходится оценивать воздействие пограничного слоя на динамику протекания гетерогенной смеси в каналах, которые имеют удлиненную форму.

В процессе проведения такого анализа во внимание учитываются многочисленные допущения. Допустим, при малых значениях размеров частиц температурный перепад в объеме во внимание не принимается. Последнее, приближенное к реальным условиям состояние, ведь по оценкам величина Био меняется в рамках $Bi = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ [94].

Также считалось, что вязкостные эффекты, которые стоят в зависимости от поверхностной температуры, по причине низких величин температуры частиц – не влияют особенно на аэродинамическое сопротивление частиц. В таком случае при анализе в рамках приближенной модели межфазного взаимодействия частицы и газового потока это дает возможность считать тепловую и динамическую передачи как независимые величины.

Имеем, что алгоритм расчета параметров потока вязкого газа составляется на основе применения классической модели плоского пограничного слоя [94, 95]. Добавим, что динамическая задача выступала в качестве системы интегрально-дифференциальных уравнений импульса, толщины вытеснения:

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho_{\infty} \cdot u_{\infty, \text{газ}}^2} \quad (3.17)$$

По рекомендациям [90, 94] где показано, что число Маха набегающего потока M_{∞} , а также температурный фактор $T_w / T_{\text{газ}}$ и число Рейнольдса Re_w слабо влияют на форму профиля скоростей по толщине пограничного слоя, было принято, что:

$$\frac{u(y)}{u_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.18)$$

В таком случае, связь между интегральными характеристиками пограничного слоя определялась в виде:

$$\frac{\delta^{**}}{\delta} = 1 - \frac{\delta^*}{\delta} - n \int_0^1 \frac{z^{n+1} dz}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_\infty^2\right) \left[(1 - \bar{T}_w)z + \bar{T}_w\right] - \frac{k-1}{2} M_\infty^2 z^2} \quad (3.19)$$

$$\frac{\delta^*}{\delta} = 1 - n \int_0^1 \frac{z^n dz}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_\infty^2\right) \left[(1 - \bar{T}_w)z + \bar{T}_w\right] - \frac{k-1}{2} M_\infty^2 \cdot z^2} \quad (3.20)$$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,0575}{Re_x^{0,2}} \left(\frac{\delta^{**}}{\delta}\right)^{-0,8} \frac{\left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_\infty^2\right)^{0,6}}{\left(1 + 0,75 \frac{(k-1)}{2} M_\infty^2\right)^{1,05}} \bar{T}_w^{0,6} \left(\frac{2}{1 + \bar{T}_w}\right)^{1,05} \quad (3.21)$$

Представленная выше система уравнений пограничного слоя позволила рассчитать сверхзвуковые течения, полученные в реальных соплах удлиненных форм. В качестве исходных параметров для расчета применяется величина торможения потока P_0 , T_0 и α также геометрия самого сопла. Далее в рамках таблицы 3 будут представлены расчетные сведения.

Таблица 3 Результаты расчётов сверхзвуковых течений, полученных в реальных соплах удлиненных форм

$d_{кр}$	$d_{ср}$	$M_{ср.ф}$	Re_x	$M_{ср.р}$	$d_{ср.ф}/d_{ср.р}$	$M_{ср.эк}$
мм	мм	-	-	-	-	-
3,5	12,2	3,45	6,3x105	4,14	0,71	-
4,5	9,5	2,55	4,36x105	3,05	0,84	2,48
4,5	9,5	2,67	5,19x105	3,05	0,845	2,6
2,72	12,65	3,87	1,2x105	4,8	0,67	-
4,72	12,65	2,84	1,27x105	3,58	0,71	-

Особого внимания заслуживают соотношения, зафиксированные между фактическим диаметром выходного сечения на ускорителе $d_{ср.ф}$ К расчетному, технологическому диаметру конструкции $d_{ср.р}$. Вместе с тем, имеется некоторое различие в отношении числа Маха по факту $M_{ср.ф}$ к его значению, что рассчитано по адиабатической теории течения $M_{ср.ад}$, а также в отношении $M_{ср.ф}$ к числу Маха $M_{ср.эк}$, полученному экспериментально для данного ускорителя. В целях проведения сравнения, в таблице 3 последние 2 строчки – это данные работы [98]. Сравнив параметры, видим удовлетворительность их соответствия.

Таким образом, проведенный анализ установил заметное влияние нарастания толщины пограничного слоя на характер течения вязкого газа в ускорителях удлиненных форм.

Проведенные расчеты с использованием представленной выше системы уравнений (3.17)...(3.21) показывают, что, например, в коническом ускорителе с диаметром критики $d_{кр} = 1$ мм пограничный слой смыкается на расстоянии $L = 10... 12$ мм от критического сечения. В процессе постепенного наращивания диаметра критики ускорителя до отметки $d_{кр} = 2$ мм пограничный слой будет смыкаться на дистанции $L = 100...120$ мм. Вниз по потоку в двух ускорителях происходит установление турбулентного потока. В таком случае сильно усложняется применение микро-ускорителей в технологических установках. Проектирование их будет выполняться на основании увеличения толщины пограничного слоя около стенок ускорителя.

Далее в работе предстоит проанализировать динамику движения частиц твердой фазы в микроускорителях удлиненной формы. Ранее было сказано о том, что скорость частиц V_p можно найти на основании рода материала, а также на основании размера частиц, по скорости $u_{газ}$ и плотностью $\rho_{газ}$. Во внимание также принимается скорость газового потока, характер протекания газа-носителя внутри ускорителя.

На рисунке 3.3 представлены результаты расчетов и измерений относительной скорости частиц алюминия [99] в сопоставлении с результатами работы [98]. В экспериментах применялись промышленные порошки с дисперсностью $R_p = (2,5...25) \cdot 10^{-6}$ м. Скорость газового потока варьировалась в пределах $u_{газ} = 200...1200$ м.

Основная сложность применения данной методики, на наш взгляд, заключается в том, что форма частиц промышленных порошков, используемых в экспериментальной и технологической практике, существенно отличается от сферической, для которых зависимость C_f от Re_w

известна [92]. Этим можно объяснить расхождение результатов расчета относительной скорости для сферических частиц с $C_f = 0.5$.

На рис 3.3 приведены также результаты расчетов для частиц несферической формы с коэффициентом аэродинамического сопротивления, $C_f = 1.0$.

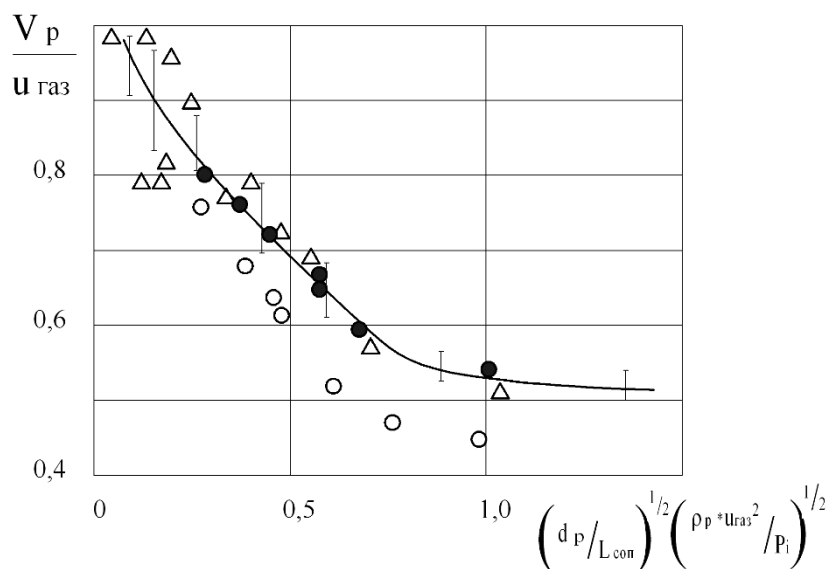


Рисунок 3.3. Изменение относительной скорости частицы от безразмерного комплекса параметров:

L_{con} – длина ускорителя, P_i – давление в расчетном сечении ускорителя (расчет /99/), Δ – эксперимент /98/, $\circ$ – результаты работы /99/ при $C_f = 0.5$,

● – результаты данной работы $C_f = 1.0$ /99/

Как видно, при $C_f = 1.0$ наблюдается хорошая корреляция результатов.

Из приведенных на рисунке 3.3 данных следует, что для рассмотренных условий влияние нарастания пограничного слоя на уменьшение скорости газа-носителя $u_{\text{газ}}$ составляет порядка 16%, а на уменьшение скорости частиц V_p до 10%.

3.4. Математическая модель сверхзвукового гетерогенного потока при натекании на плоскую преграду.

Решение второй проблемной задачи, приведённой выше в п.3.3 прямо связано с взаимодействием высокоскоростных частиц малого размера с твердой поверхностью. Принимая во внимание механику твердого тела, было

определено, что ударное приложение нагрузки приводит к образованию ударных волн в твердом теле. Далее они перерастают в другие процессы. В таком случае на местах сосредоточения волн реализуются процессы пластической и упругой деформации; происходит адиабатическое преобразование механической энергии в тепло. Могут быть также структурные и фазовые изменения. В конечном итоге, комплекс представленных выше процессов образует задачу со множеством параметров. Ее решение даст возможность создать оптимальную технологию для формирования покрытий высокого качества, с заданными строго функциональными свойствами.

3.4.1. Расчёт течения при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду

Проводится анализ осесимметричного протекания гетерогенного сверхзвукового потока при его наплыве на плоскую стенку. На рисунке 3.4 отражена схема такого течения.

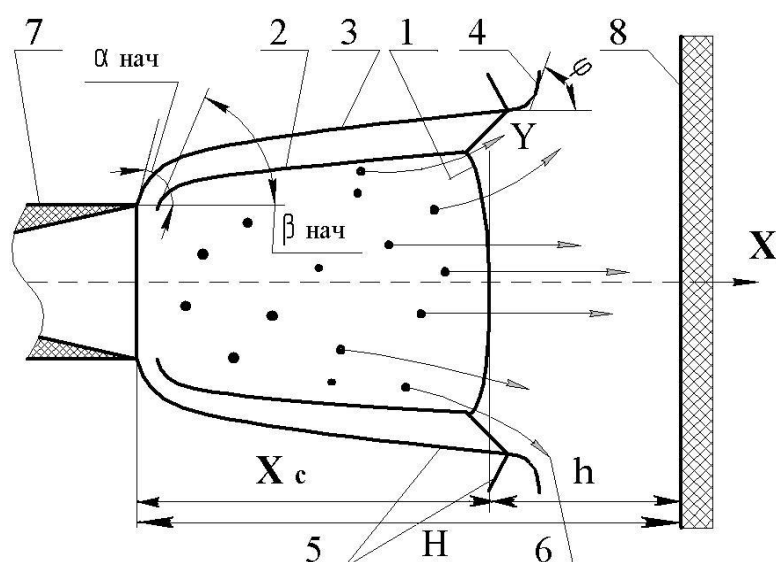


Рисунок 3.4. Схема течения сверхзвукового гетерогенного потока на участке Н от среза сопла до преграды:

1 – ударная волна, 2 – висячий скачок уплотнения, 3 – отраженный скачок уплотнения, 4 – граница поворота потока, 5 – внешняя граница потока, 6 – траектории частиц, 7 – ускоритель, 8 – преграда, h – толщина сжатого слоя,

X_c – координата ударной волны от среза ускорителя, $\alpha_{нач}$ – начальная угловая координата отраженного скачка, $\beta_{нач}$ – угловая координата висячего скачка, φ – текущая угловая координата поворота потока

В целом, перед нами имеется двухмерная задача, так как при прохождении через отошедшую ударную волну, а также через сжатый слой, вектора скоростей твердой и газовой фазы будут менять направление. В настоящем исследовании был предложен приближенный подход к решению поставленной задачи. Другими словами, метод дает возможность определить параметры твердой фазы перед биением по поверхности, еще на начальном участке гетерогенного свободного потока – со среза сопла и до ударной волны. Данный участок определяется по координате вдоль оси потока $X = H - h$ (рисунок 3.4).

На заданном участке газовая динамика протекания гетерогенного потока на поверхности стенки может быть описана посредством уравнения Прандтля-Майера [103...105, 107, 108, 114].

На основании системы уравнений можно определить угол поворота потока γ в виде:

$$\gamma = \alpha - \varphi - (\alpha_{нач} + \varphi_{нач}) \quad (3.22)$$

где α – реальный угол, по которому распространяются в потоке малые возмущения;

φ – текущий угол наклона скачка висячего по уплотнению; $\alpha_{нач}$ – угол, по которому распространяются малые возмущения на среде в сопле; $\varphi_{нач}$ – текущий угол наклона висячего скачка уплотнения на срезе сопла (рисунок 3.4).

В свою очередь из газовой динамики следует [90]:

$$\varphi_{нач} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arcsin \sqrt{\frac{k-1}{2} (\lambda_{ср}^2 - 1)} \quad (3.23)$$

$$\alpha_{нач} = \arcsin \left(\frac{1}{M_{ср}} \right) \quad (3.24)$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arccos \left[\sqrt{\frac{k+1}{2}} \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \quad (3.25)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{1}{M} \right) \quad (3.26)$$

$$\lambda_{cp} = \frac{M_{cp}}{\left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{cp}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.27)$$

$$M = \frac{\left(\frac{2}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.28)$$

$$\lambda(\varphi) = \left[1 + \frac{2}{k-1} \sin^2 \left(\varphi \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \right) \right] \quad (3.29)$$

где λ_{cp} и M_{cp} газодинамические функции на срезе сопла.

Установлено, что система 3.23...3.29 будет решаться на основании применения параметров гетерогенного потока у среза сопла; данные получены на основании расчета по алгоритму, который представлен в разделах 3.1 и 3.2.

Процедура расчета осуществляется методом итераций от среза сопла до сечения X_c (рисунок 3.4); применяется при этом соотношение [107, 108].

$$X_c = 0,745 d_{cp} M_{cp} \sqrt{kn} - 0,83 d_{cp} M_{cp} \exp \left(-1,73 \frac{X_p}{d_{cp} M_{cp} \sqrt{kn_0}} \right) \quad (3.3)$$

где d_{cp} и M_{cp} - диаметр и число Маха на срезе сопла, $n = P_{cp}/P_H$, P_H – давление окружающей среды.

За прямым скачком уплотнения параметры газа от того, что параметры частиц при переходе через ударную волну не претерпевают разрыва, могут определяться по соотношению Ренкина – Гюгонио в виде:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \quad (3.31)$$

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (3.32)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right) M_1^2 + \frac{k-1}{k+1} \quad (3.33)$$

где индексы «1» и «2» представляют параметры газа до - и после скачка, соответственно.

Принимая во внимание анализ, построим алгоритм расчета параметров частиц, их температуру и скорость, распределение в рамках сверхзвукового гетерогенного потока. Расчет выполняется в определенной последовательности:

- на основании выбранного контура ускорителя $F(x)$ (раздел 3.2); расчет ведется с учетом определения скорости газа и давления газовой фазы по длине канала – до начала среза;
- по 3.30 определим X_c отошедшей ударной волны;
- проводится решение уравнений 3.31...3.33, определяются параметры газовой фазы, что стоит за ударной волной.

3.4.2. Расчёт инерционного движения частиц сверхзвукового гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой.

Тот факт, что имеется твердая фаза, может существенно воздействовать на газодинамику натекания на плоскую стенку гетерогенного сверхзвукового потока. Но в том случае, если концентрация массовая твердой фазы будет меньше газовой, не более 10%, то воздействие почти аннулируется [138].

При данной постановке задача сводится к решению взаимодействия с преградой сверхзвуковой газовой струи. Данная задача была исследована идеально в [96, 97, 102].

Что касается НТГДМ технологии, то будет рассмотрен случай предельно малых концентраций дисперсной фазы. То есть, механизм

взаимодействия струи и преграды – стабильный, точно такой, как показано на рисунке 3.5.

Чтобы решить задачу, нужно учесть некоторые допущения:

- ударная отходящая волна имеет плоскую структуру;
- плотность и температура газа, градиенты скорости в сжатом слое – неизменные;

- коэффициенты релаксации скорости, температуры частиц постоянны; равны значениям, расчет которых проводится на основании параметров газа, частиц после прохождения ударной волны, после сжатого слоя [110].

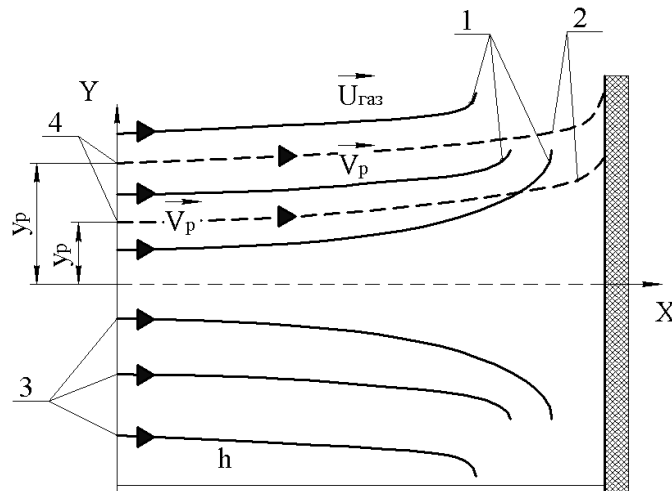


Рисунок 3.5. Схема течения гетерогенной смеси в сжатом слое

Пусть $u_{газ}$, $T_{газ}$, $\rho_{газ}$, $\varphi_{V, газ}$ и $\varphi_{T, газ}$ - соответствующие параметры газовой фазы. V_p , T_p , ρ_p , $\varphi_{V, p}$ и $\varphi_{T, p}$ - соответствующие параметры твердой фазы (частиц). Если будет решено уравнение неразрывности, принимая во внимание обозначенные допущения, можно получить выражение для поля скоростей газовой фазы за ударной волной плоской структуры:

$$u(x) = u_{газ} \left(1 - \frac{x}{h}\right) \quad (3.34)$$

$$v(y) = \frac{u_{газ}}{(\gamma + 1) h} y \quad (3.35)$$

где x и y – текущие координаты, h – см. рисунок 3.4, $\gamma = 0$ для плоского и $\gamma = 1$ для осесимметричного случаев. При этом $y = y_{\max} = R_{\text{ст}}$ – радиус потока перед ударной волной.

Уравнения движения и энергии для частиц с соответствующими граничными условиями имеет вид :

- уравнения движения:

по координате X

$$\ddot{x}_p = \varphi_{V,p} \left[u_{\text{газ}} \left(1 - \frac{x_p}{h} \right) - \dot{x}_p \right] \quad (3.36)$$

по координате Y :

$$\ddot{y}_p = \varphi_{V,p} \left[u_{\text{газ}} \left(\frac{u_{\text{газ}} y_p}{(y + 1)h} \right) - \dot{y}_p \right] \quad (3.37)$$

начальные условия: $\dot{x}_p = V_p$ при $\tau = 0$, $x_p = 0$ при $\tau = 0$. $\dot{y}_p = V_{p,y}$, при $\tau = 0$, $y_p = R_{\text{ст}}$ при $\tau = 0$.

- уравнение энергии:

$$T_p = \varphi_{T,p} (T_{\text{газ}} - T_{p,\text{нач}}) \quad (3.38)$$

при следующих начальных условиях: $T_p = T_{p,\text{нач}}$, при $\tau = 0$.

Система координат для сформулированной задачи приведена на рисунке 3.5.

Дифференциальные уравнения (3.36...3.38) являются линейными с постоянными коэффициентами. Их решения имеют следующий вид [109]:

- координата по направлению X

$$x_p = h + \frac{V_p + h\lambda_{2,x}}{\lambda_{1,x} - \lambda_{2,x}} \exp(\lambda_{1,x}) + \frac{V_p + h\lambda_{1,x}}{\lambda_{2,x} - \lambda_{1,x}} \exp(\lambda_{2,x}) \quad (3.39)$$

$$\lambda_{x_{1,2}} = -\frac{\varphi_{V,p}}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4u_{\text{газ}}}{\varphi_{V,p} h}} \right)$$

где,

- координата по направлению Y

$$y_p = \frac{V_p - y_{p,\text{нач}} \lambda_{2,y}}{\lambda_{1,y} - \lambda_{2,y}} \exp(\lambda_{1,y}) + \frac{V_p - y_{p,\text{нач}} \lambda_{1,y}}{\lambda_{2,y} - \lambda_{1,y}} \exp(\lambda_{2,y}) \quad (3.40)$$

$$\lambda_{y_{1,2}} = -\frac{\varphi_{V,p}}{2} \left(1 \pm \frac{4V_p}{(\gamma-1)\varphi_{V,p}h} \right)$$

где,

температура частицы:

$$T_p = T_{\text{газ, сж.}} - (T_{\text{газ, сж.}} - T_{p,\text{нач}}) \exp(-\varphi_{T,p}) \quad (3.41)$$

Установлено, что коэффициенты $\varphi_{V,p}$ и $\varphi_{T,p}$, включенные в состав 3.39 и 3.40, стоят в зависимости от режима обтекания частицы газом-носителем, определяются по:

$$\varphi_{V,p} = \frac{3 \rho_{\text{газ}} (u_{\text{газ}} - V_p)}{4 \rho_p \cdot d_p} C_f (Re_{d_p}, M)$$

$$\varphi_{T,p} = 6 \frac{Nu_{d_p} (Re_{d_p}, Pr) \lambda \cdot \rho_{\text{газ}} |u_{\text{газ}} - V_p|}{Re_{d_p} \cdot \eta_p \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot c_p}$$

где $c_{p,m}, \rho_p, d_p, c_p, \lambda_{\text{газ}}$ - параметр массовой концентрации твердой фазы, что сконцентрирована в рамках гетерогенного потока; плотность материала частиц, их диаметр и удельная теплоемкость, теплопроводность газа – соответственно.

Выражения 3.39 и 3.40 – это траектории движения частиц, что сконцентрированы на участке h между ударной волной, а также стенкой – направления x и y . Знакомство с данными уравнениями дает возможность определить режимы протекания частиц у поверхности преграды с точки зрения потенциального достижения ими поверхности.

С 3.41 видим, что температура частиц T_p монотонно приближается к температуре газа, что в сжатом слое.

Проанализировав соотношения 3.39-3.41, видим, что в общем случае может быть установлено несколько режимов. Их реализация протекает при нанесении покрытий. На этом основании выстраиваются научные доводы НТГДМ технологии для создания покрытий.

По выражениям 3.39 и 3.40 видим, что режим протекания твердой и газовой фазы около поверхности (участок h, рисунок 3.5) стоит в зависимости от двух безразмерных комплексов для газа-носителя, а также частиц.

Обозначим их $K_{\text{газ}}$ и K_p , соответственно, т.е.:

$$K_{\text{газ}} = \frac{u_{\text{газ}}}{\varphi_{V,p} h} \quad \text{и} \quad K_p = \frac{V_p}{\varphi_{V,p} h}. \quad (3.42)$$

Получим зависимость:

$$K_p = K_{\text{газ}} \frac{V_p}{u_{\text{газ}}} \quad (3.43)$$

Становится совершенно очевидно, что $K_p < K_{\text{газ}}$. Но только для частиц субмикронного диапазона, где $u_{\text{газ}} = V_p$, может быть и так, что $K_p = K_{\text{газ}}$.

Следовательно, 2 режима течения определим значениями λ_{x_1} и λ_{x_2} , которые по 3.39 имеют вид:

$$\lambda_{x_1} = - \frac{\varphi_{V,\text{газ}}}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 4K_{\text{газ}}} \right) \quad (3.44)$$

$$\lambda_{x_2} = - \frac{\varphi_{V,\text{газ}}}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 4K_{\text{газ}}} \right) \quad (3.45)$$

Теперь рассмотрим выражения 3.44, а также 3.45, чтобы определить потенциально полезные режимы при нанесении покрытия с применением НТГДМ технологии.

По (3.44) и (3.45) видим, что λ_{x_1} и λ_{x_2} могут быть в общем случае как действительными, так и мнимыми. Если $K_{\text{газ}} \leq 0,25$, то λ_{x_1} и λ_{x_2} действительные числа. Иначе они мнимые.

Рассмотрим несколько вариантов:

Вариант №1. Пусть $K_{\text{газ}} < 0,25$, а $K_p < 0,5 \left(1 + \sqrt{1 - 4K_{\text{газ}}} \right)$.

Значит, по 3.44 и 3.45 λ_{x_1} и λ_{x_2} будут вещественными, не равные друг другу. В данном случае решение уравнения движения частиц 3.36 при $x_p > 0$ имеет вид:

- для координаты X

$$x_p = h \left\{ 1 + \exp(-\bar{\tau}) \left[\frac{2K_p - 1}{\Delta_x} \operatorname{sh}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) - \operatorname{ch}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) \right] \right\} \quad (3.46)$$

- для скорости частиц:

$$V_p = V_{p, \text{cp}} \exp(-\bar{\tau}) \left[\operatorname{ch}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) + \frac{1}{\Delta_x} \left(\frac{2K_{\text{газ}}}{K_p} - 1 \right) \operatorname{sh}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) \right] \quad (3.47)$$

$$\text{где } \Delta_x = \sqrt{1 - 4K_{\text{газ}}}, \quad \bar{\tau} = \frac{\varphi_{V,p} \cdot \tau}{2} \quad (3.47f)$$

Анализируя поведение функций (3.46) и (3.47), можно показать, что при всех $\bar{\tau} > 0$ функция $V_p > 0$, в то время как максимальное значение функции $x_p < h$.

Таким образом, в рассматриваемом варианте частицы не достигают поверхности.

Вариант №2. Пусть $K_{\text{газ}} = 0,25$, а $K_p \leq 0,5$.

Тогда λ_{x_1} и λ_{x_2} вещественны и равны между собой. В таком случае, решение уравнения (3.36) упрощается и принимает вид:

- для координаты X

$$x_p = h \left\{ 1 + \exp(-\bar{\tau}) \left[\bar{\tau} (2K_p - 1) \right] \right\} \quad (3.48)$$

- для скорости частиц:

$$V_p = V_{p, \text{cp}} \cdot \exp(-\bar{\tau}) \left[1 + \left(\frac{1}{2K_p} - 1 \right) \cdot \bar{\tau} \right] \quad (3.49)$$

Очевидно, что такой вариант точно такой, как и предыдущий, то есть при всех $\bar{\tau} > 0$ функция $V_p > 0$, в то время как значение функции $x_p < h$.

Обозначенные выше режимы были найдены экспериментальным путем. Практическая их реализация будет определена формой частиц, а также дисперсностью последних. Допустим, если частицы из субмикронного диапазона по форме далеки от сферической, то они с большим аэродинамическим сопротивлением будут тормозиться в сжатом слое, сноситься потоком газа вдоль стенки, так и не достигая поверхности.

Таким образом, прочие потенциальные варианты, которые мы получаем с анализа выражений 3.39 и 3.40, определяют условие, при котором $x_p > h$. Другими словами, траектории частиц будут такими, при которых они будут достигать поверхности преграды. На данных режимах создание покрытий определяется важными параметрами, среди которых выделим:

- в
- скорости частиц составят V_p перед ударной волной;
- коэффициентом $N_{p,h}$ принимает во внимание долю тех частиц, которые достигли поверхности.

я

$$N_{p,h} = \frac{dy_p}{dy_{p,h}} \quad (3.50)$$

п

- коэффициентом $M_{p,h}$, где принимается во внимание отношение рабочей площади гетерогенной струи, что создает покрытие, к площади струи до ударной волны.

л

е

т

$$M_{p,h} = \frac{y_p^1 - y_p^2}{y_{p,h}^1 - y_{p,h}^2} \quad (3.51)$$

а

- расход массовых частиц – безразмерно мал ;речь идет о частицах, которые пролетают через площадь между двумя малыми до безразмерное у частиц в толщине сжатого слоя; бесконечности траекториями:

$$dm = \rho_{p,фик} \cdot u_p \cdot dy_p = \rho_{p,h,фик} \cdot u_{p,h} \cdot dy_{p,h} \quad (3.52)$$

В записанных формулах: y_p , и $y_{p,h}$ координаты по оси У линий (траекторий) частиц до- и после ударной волны, y_p^1 и y_p^2 - координаты двух

соседних траекторий частиц до ударной волны, $Y_{p,h}^1$ и $Y_{p,h}^2$ - координаты двух соседних траекторий частиц после ударной волны, $\rho_{p, \text{фик}}$ и $\rho_{p,h \text{ фик}}$ - фиктивные плотности частиц в элементарном объеме гетерогенной струи до и после ударной волны.

Обозначим их отношение в виде:

$$\bar{\rho}_p = \frac{\rho_{p,h \text{ фик}}}{\rho_{p, \text{фик}}} = \frac{V_p}{V_{p,h}} M_{p,h} \quad (3.53)$$

Так как $\bar{\tau}_h$ не зависит от поперечной координаты Y , то преобразовав, (3.40) и поставив полученное выражение в (3.51), получим:

$$M_{p,h} = \exp(\bar{\tau}_h) \left[\text{ch}(\bar{\tau}_h \cdot \Delta_y) + \frac{1}{\Delta_y} \left(1 + \frac{2dV_p}{\varphi_{V,p} \cdot dy_p} \right) \text{sh}(\bar{\tau}_h \cdot \Delta_y) \right] \quad (3.54)$$

На основании ранее представленных величин, можно провести анализ для определения потенциальных режимов движения частиц.

Вариант № 3. Пусть $K_{\text{газ}} < 0,25$, а $K_p > 0,5(1 + \sqrt{1 - 4K_{\text{газ}}})$.

В этом случае формула для расчета безразмерного времени пролета частицами толщи сжатого воздуха получает вид:

$$\bar{\tau}_{p,h} = \frac{1}{\Delta_x} \ln \left(\frac{2K_p - 1 + \Delta_x}{2K_p - 1 - \Delta_x} \right) \quad (3.55)$$

Если подставить найденное значение $\bar{\tau}_{p,h}$ последовательно в формулы (3.47) и (3.47а), можно определить скорость частицы $V_{p,h}$ у поверхности подложки после преодоления ею ударной волны и сжатого слоя. Затем по (3.54) рассчитывается $M_{p,h}$ и далее $\bar{\rho}_p$, используя (3.53).

Вариант № 4. Пусть $K_{\text{газ}} = 0,25$, а $K_p > 0,5$.

Тут формула для расчета безразмерного времени пролета частицами толщи сжатого слоя получает вид:

$$\bar{\tau}_h = (2K_p - 1)^{-1} \quad (3.56)$$

На основании операций, которые будут аналогичны прошлому варианту, рассчитаем фиктивную плотность частиц, которые достигают поверхности стенки и формируют заданное покрытие.

В целом, могут быть и другие режимы течения, при которых частицы достигнут поверхности. Например, режим, согласно которому $K_{\text{газ}} > 0,25$, а $K_p \geq 0,5$. Но, проанализировав его, видим максимальную схожесть с предыдущим вариантом.

Результаты проведенного анализа позволили получить зависимость для оценки скорости частиц после прохождения ими ударной волны и сжатого слоя в виде:

$$V_p = V_{p, \text{ср}} \exp(-\bar{\tau}) \left[\text{ch}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) + \frac{1}{\Delta_x} \left(\frac{2K_{\text{газ}}}{K_p} - 1 \right) \text{sh}(\bar{\tau} \cdot \Delta_x) \right] \quad (3.57)$$

В заключении данного раздела следует отметить, что проведенный анализ и его дальнейшее развитие имеет большое практическое приложение, так как результаты этого анализа позволяют разработать научные основы НТГДМ-технологии.

Таким образом, решения рассмотренных выше задач позволяют в дальнейшем провести исследование механизма взаимодействия частицы с подложкой.

Выводы по главе 3

1. Представлены разработанная математическая модель задачи расчёта установившегося течения неизотермической гетерогенной смеси при наличии межфазного теплообмена и предложен упрощённый алгоритм её расчёта. Расчет показывает, что скорость частиц можно рассчитать на основании рода материала, размера частиц, плотности, скорости газового потока, по характеру протекания газа-носителя внутри ускорителя.
- ассмотрено течение 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%.

представлена приближенная математическая модель расчёта течения при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду, и проанализированы режимы инерционного движения частиц в жатом слое.

ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА С ТВЁРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.

Частицы формируемого покрытия в процессе ускорения накапливают два вида энергии:

энергия нагрева от начальной температуры до температуры
пластификации или даже до температуры плавления

$$I_{\text{наг}} = m_p \left(\int_{T_{\text{нач}}}^{T_{\text{пл}}} c_p dT + r_{\text{пл}} \right) \quad (4.1)$$

Кинетическая энергия

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_p V_p^2}{2} \quad (4.2)$$

Для газотермических методах, альтернативных НТГДМ, энергия нагрева значительно превышает кинетическую.

$$I_{\text{наг}} \gg E_{\text{кин}} \quad (4.3)$$

Тем не менее, нагревание частиц в газовом высокотемпературном потоке при всех преимуществах имеет колоссальный недостаток – частица при нагревании претерпевает сильные химические, физические трансформации, что влечет за собой понижение качества покрытия. Для устранения этого недостатка необходимо процесс ускорения частиц в потоке организовать таким образом, чтобы исключить существенный нагрев частиц, а утраченную долю энергии нагрева компенсировать увеличением ее кинетической энергии до необходимого уровня [7]. Корреляция между энергиями, представленными выражениями (4.1) и (4.2), должна соответствовать неравенству вида

$$E_{\text{кин}} \gg I_{\text{наг}} \quad (4.4)$$

Для выполнения условия (4.4) твердую фазу гетерогенного потока необходимо разогнать в ускорителе, в сверхзвуковом потоке с низкой статической температурой, до соответствующей скорости. При этом, возникает необходимость в точном знании уровня этой скорости в момент

удара частицы о подложку. Как отмечалось, это связано с тем, что скорость частиц определяет механизм формирования покрытия. Понятно, что этот механизм весьма сложный. В нем сочетается ряд химических, физических процессов, в том числе – пластическая деформация подложки, частиц, нагревание; могут быть фазовые переходы материалов частиц и подложки. Тут особого внимания заслуживает 2 определяющих процесса [130]:

- Проникновение частицы с высокой скоростью в подложку, что сопровождается пластической деформацией и нагревом, локальным изменением агрегатного состояния материалов – как признак механического воздействия;
- Значительное контактное взаимодействие, что выражается в появлении прочных связей в месте контакта между материалами частиц, а также подложки с образованием химических связей.

При больших скоростях частиц в момент удара о подложку указанные два процесса происходят одновременно.

4.1. Механизм взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с твердой стенкой конструкции.

В НТГДМ-технологии в силу малости энергии нагрева, ею можно пренебречь и считать, что только кинетическая энергия частиц является определяющей при формировании покрытий. Оценки показывают, что, например, для частиц алюминия, обладающих скоростью в момент удара о подложку 800м/сек, энергия нагрева частицы составляет всего лишь 1...2% от кинетической энергии. При биении высокоскоростной частицы по твердой поверхности, кинетическая энергия используется на реализацию химических, физических процессов, которые сопутствуют созданию покрытия [117].

Уравнение баланса энергии в момент удара можно представить в виде:

$$E_{\text{кин. р}} = E_{\text{деф. р}} + E_{\text{деф. под}} + E_{\text{наг. р}} + E_{\text{наг. под}} \quad (4.5)$$

Пусть не вся приобретённая кинетическая энергия идёт на нагрев частиц при соударении с подложкой, тогда:

$$\frac{V_p^2}{2} = k_{ак} \left(\int_{T_{нач}}^{T_{пл}} c_p \cdot dT + \lambda_{пл} \right) \quad (4.6)$$

где $k_{ак}$ — коэффициент аккомодации, учитывающий долю кинетической энергии частицы, перешедшей в тепловую, V_p - скорость частицы в момент удара о поверхность; c_p - удельная теплоемкость материала частицы, $T_{пл.p}$ - температура плавления материала частицы, $\lambda_{пл.p}$ - удельная теплота плавления материала частицы.

В зависимости от типа удара $k_{ак}$ может изменяться в пределах $0 \leq k_{ак} \leq 1$, причем предельные значения $k_{ак} = 0$ и $k_{ак} = 1$ соответствуют абсолютно упругому и абсолютно пластическому удару, соответственно. Очевидно, тип удара определяется скоростью частицы, которая непосредственно зависит от скорости газа-носителя /100, 101/

При упругом ударе частицы о подложку, превращение энергии из одного вида в другой отсутствует. Частица отражается от подложки со скоростью, равной скорости падения. В этом случае процесс нанесения покрытия не реализуется.

Назовем предельную скорость частицы, при которой еще реализуется упругий удар, первой критической скоростью $V'_{р.кр}$ [114]. Можно также предположить существование второй критической скорости $V''_{р.кр}$. Эта скорость представляет собой некую скорость частицы, при которой твердая поверхность начинает механически разрушаться (процесс эрозии подложки) при бомбардировке частицами ее поверхности.

Указанные критические скорости можно рассчитать, используя законы механики сплошной среды, которые позволяют определить параметры движения высокоскоростного гетерогенного потока [114].

Из сказанного выше следует, что при формировании покрытий НТГДМ-технологией, практический интерес представляет оценка скорости удара частицы в диапазоне $V'_{р.кр} \leq V_{р.кр} \leq V''_{р.кр}$.

С этой целью проведем краткий анализ по определению скорости одиночной сферической частицы, перемещающейся в газовом потоке. Данный анализ можно будет переносить и на поток частиц, если гетерогенный поток имеет малую объемную концентрацию твердой фазы, как это отмечалось ранее и принято НТГДМ. В данной ситуации взаимное воздействие частиц, не только на движение касательно друг друга, но и на параметры газа-носителя, будет несущественным. Практика показывает [114], что условие выполняется, когда:

$$\frac{l_p}{d_p} = 0,5x_i^{-0,3} < 3 \quad (4.7)$$

где x_i – мольная доля частиц в гетерогенной смеси, l_p – расстояние между ними в смеси (потоке), d_p – диаметр частиц.

Таким образом, с определенной степенью допущения, первую критическую скорость можно оценить, используя простое соотношение [114]:

$$0,5\rho_p V_p^2 \leq H_\mu \quad (4.8)$$

здесь H_μ – микротвердость материала подложки; ρ_p – плотность материала частицы; V_p – скорость в момент упругого удара частиц о подложку.

Выражение (4.8) выполняется всегда, если частицы в потоке твердые, а также, если микротвердости подложки и частицы сравнимы. В случае заметного различия этих параметров целесообразно в (4.8) использовать меньшую из величин микротвердостей либо частицы, либо подложки.

В таком случае из (4.8) имеем:

$$V_p' \leq \sqrt{\frac{H_\mu}{\rho_p}} \quad (4.9)$$

Например, в случае нанесения покрытия из алюминия ($H_\mu = 300$ МПа) на стальную подложку ($H_\mu = 750$ МПа) в (4.9) необходимо подставить минимальное значение ($H_\mu = 300$ МПа). Тогда, при плотности частицы из

алюминия $\rho_p = 2700 \text{ кг/м}^3$, легко рассчитать первую критическую скорость

для выбранной пары. Она оказывается равной $V'_p = 330 \text{ м/с}$, для пары медь - железо: $V'_p = 258 \text{ м/с}$, для пары никель – медь $V'_p = 365 \text{ м/с}$.

Проведем анализ для оценки второй критической скорости V''_p [114]. Очевидно, V''_p должна быть значительно больше, чем V'_p . При $V_p = V''_p$ подложка начинает разрушаться от воздействия твердых частиц. В таком случае, можно составить уравнение баланса энергии на разрушающейся поверхности, если ввести понятие удельной энергии разрушения (энтальпии эрозии $I_{эр}$) материала подложки в виде:

$$I_{эр} = \overline{C}_p (T_{W,эр} - T_{нач}) + \Delta Q_{ф.п} + E_{мех} \quad (4.10)$$

где $\overline{C}_p$ - средняя удельная теплоемкость материала подложки, $\Delta Q_{ф.п}$ — теплота фазовых переходов, $E_{мех}$ — энергия, затраченная на механическое разрушение единицы массы подложки. Эта энергия возникает в процессе взаимодействия частицы с подложкой если частица падает на поверхность подложки не по нормали, а под некоторым углом. При таком «косом» ударе энергия $E_{мех}$ может быть представлена в виде:

$$E_{мех} = \frac{\sigma_{ср}}{\rho_{подл}} \quad (4.10)$$

где $\sigma_{ср}$ — сопротивление среза материала подложки, $\rho_{подл}$ — плотность материала подложки.

Понятно, что кинетическая энергия на единицу массы частицы перед ударом о подложку, должна быть меньше энтальпии эрозии материала подложки $I_{эр}$, т.е.:

$$\frac{V_p^2}{2} < I_{эр} \quad (4.11)$$

Или:

$$V_p'' \leq \sqrt{2I_{\text{эп}}} \quad (4.12)$$

В настоящее время в инженерной практике непосредственное использование формы (4.12) для оценки второй критической скорости не всегда возможно, поскольку значения энтальпий разрушения для большинства материалов не известны. Однако приближенную оценку величин второй критической скорости для разного рода материалов можно проводить, используя (4.10) для расчета $I_{\text{эп}}$ и далее, с помощью (4.12) определить V_p'' .

Например, для подложки из меди при $T_{\text{пл}} = 1356 \text{ К}$ и удельной теплоемкости

$$C_{\text{Cu}} = 533 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \Delta Q = 2,13 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad \text{примерное значение}$$

второй критической скорости частицы $V_p'' = 1230 \text{ м/сек}$ [114].

Проведенный выше анализ дает возможность установить диапазон изменения скоростей частиц, в котором осуществляется формирование покрытий НТГДМ-технологией. Таким диапазоном должен быть $V_{p \text{ кр}}' \leq V_{p \text{ кр}} \leq V_{p \text{ кр}}''$. Как показано, предельные значения скоростей $V_{p \text{ кр}}'$ и $V_{p \text{ кр}}''$, зависит от рода материала его физических свойств, формы частицы и др. Определение критических скоростей возможно, если существует методика расчета скорости частиц $V_{p \text{ кр}}$ в момент удара. Эта скорость зависит от характеристик гетерогенного потока на выходе из ускорителя. Характера течения потока на конечном участке полета частицы при преодолении ею ударной волны и сжатого слоя, а также от механических свойств материалов частицы и подложки.

4.2. Кинетика взаимодействия высокоскоростных частиц гетерогенного потока с подложкой.

Механизм взаимодействия частиц с основой и между собой можно условно разделить на три последовательные стадии [44, 45]:

- удар твердой частицы о подложку (образование физического контакта);

- активизация контактных поверхностей и химическое взаимодействие материалов с образованием связей на границе;
- объемные процессы динамические и тепловые в зоне контакта (теплопроводность, динамическая диффузия и др.).
- Понятно, что движущей силой физико-химического взаимодействия частицы с подложкой, определяющей их прочное сцепление (адгезионное и когезионное), являются большая скорость частиц, т.е. их высокая кинетическая энергия, а также механические свойства материалов частиц и подложки.

Исследования адгезионных свойств металлических покрытий [114] показали, что при скорости частиц до 700 м/с, реализуется наиболее простая, линейная зависимость прочности покрытия от скорости частиц. Когда растет скорость частиц, то кинетическая их энергия достигает таких больших параметров, когда механизм контактного влияния частицы на подложку будет сильно трансформирован. Например, значительно увеличивается уровень напорного динамического давления $P_{\text{дин}} = \rho_p V_p^2 / 2$, которое играет важнейшую роль в активировании процесса химического взаимодействия материалов частицы и подложки [41, 42].

Это обусловлено следующими факторами:

- локальным повышением в зоне удара активности поверхностных атомов, что обусловлено упругой и неупругой деформацией кристаллической решетки материалов, т.е. нарушением в них межатомных связей (механическая активация);
- переходом в момент удара определенной доли кинетической энергии в теплоту, что переводит приповерхностные атомы в активированное состояние за счет увеличения их внутренней энергии (термическая активация);
- распадом активированного комплекса атомов с последующим образованием новых межатомных связей.

Указанные три вида факторов обеспечивают снижение энергии активации материалов, что существенно увеличивает прочность покрытия, его

адгезионных и когезионных свойств. На основании эксперимента удалось установить, что рост напорного динамического давления от 1 до 7 МПа снижает энергию активации материала примерно до 20-30%, что существенно повышает качество готового покрытия.

Твердое агрегатное состояние частиц и их высокая скорость в момент удара о поверхность вызывают пластическую деформацию как частиц, так и подложки. При этом пластическая деформация играет важную роль в процессе образования прочной связи между частицами и основой. Это обусловлено тем, что напряжения, возникающие в области удара, содействуют выбросу на контактную поверхность структурных дефектов типа дислокаций, разного рода вакансий и др. Эти процессы сопутствуют разрыву межатомных связей в решетках, что способствует образованию новых активных центров, т.е. увеличению активации поверхности.

Энергия, которая может высвободиться при образовании каждого из таких дефектов, имеет различные уровни. Так, при образовании вакансии межузельных атомов она равна 0,8...1,0 эВ. При возникновении дислокаций разного рода металлах выделившаяся энергия может достигать уровня от 1 до 10 эВ при уменьшении температуры металла от температуры плавления до комнатной [35, 43]. Как видно, выделившаяся энергия увеличивается с уменьшением температуры металла. Поэтому такой процесс активации эффективен при формировании покрытий НТГДМ-технологией, поскольку при обработке конструкции высокоскоростным гетерогенным потоком ее поверхность активируется вследствие разрыва связей не в одном приповерхностном атоме металла (как в случае термической активации), а в группе атомов. Это объясняется тем, что формирование покрытий реализуется при умеренных уровнях температур частиц и подложки, т.е. высвободившаяся энергия при разрыве связей даже одного атома (около 10 эВ) является весьма значительной для процесса активации всей поверхности.

Теоретические основы физической химии показывают, что атомы приповерхностных кристаллических решеток, которые перекрыты полем упругих искажений, где энергия достигла или уже превышает определенный потенциальный барьер, демонстрируют высокую активность. Это основная

причина, по которой происходит их химическое взаимодействие с атомами разнородных металлов, например, в частицах, которые формируют покрытие. Такие соединения образуются, в первую очередь, именно в локальных местах выхода дислокаций на поверхность, где возникают некие центры очагов химического соединения наносимого покрытия и основы. Образование химических связей сопровождается развитием объемных физических процессов, таких как динамическая (ударная) диффузия, а также возможное образование новых фаз и новых композиций. Последнее расширяет масштабы применимости НТГДМ-технологии не только для формирования покрытий, но и в качестве получения новых композиционных структур.

Высказанная гипотеза подкрепляется исследованиями, проведенными авторами работы [43] и [44], в которых убедительно показано, что пластическая деформация материала подложки в тонком приповерхностном слое является необходимым условием образования прочного ее соединения с формируемым покрытием.

Таким образом, химическое взаимодействие высокоскоростных частиц между собой (в объеме покрытия) и с подложкой (когезия и адгезия), очень сложно по механизму и мало изучено. Это объясняется тем, что оно обладает высокой степенью аномальности, реализуется на уровне кристаллических решеток (молекул и атомов материала) за крайне малое время ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ с) [29, 39].

Поэтому анализ химического взаимодействия частиц с подложкой и между собой в случае создания покрытий НТГДМ-технологией должен стать предметом дальнейших научных исследований.

Как отмечалось, наиболее важными характеристиками покрытий является адгезия и когезия. Анализ экспериментальных исследований данной работы, а также ряда публикаций [118, 129], позволил установить, что, как и при формировании плазменных покрытий, покрытия, полученные НТГДМ-технологией, образуются за счет возникновения химических и механических связей.

Математическая модель этого процесса может быть представлена уравнением химической кинетики в виде [29]:

$$\frac{dN}{d\tau} = (N_0 - N) \cdot \nu \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_k}\right) \quad (4.13)$$

где T_k температура в зоне контакта; N_0 - общее число атомов в зоне контакта, N - число атомов, вступивших в химическую связь, ν — частота собственных колебаний атомов ($\nu = 10^{13} \text{ с}^{-1}$), E_a - энергия активации процесса, k - постоянная Больцмана.

Решение уравнения (4.13) имеет вид:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp\left[\nu \cdot \tau \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_k}\right)\right] \quad (4.14)$$

Уравнение в форме (4.14) неудобно применять в инженерной практике, поскольку неизвестно точное значение E_a и ряд других параметров процесса формирования покрытия. Поэтому оценку температуры T_k и давления P_k в зоне удара (контакта) целесообразнее проводить, анализируя энергетические процессы, сопутствующие взаимодействию частицы с подложкой.

4.2. Динамика удара высокоскоростной твердой частицы о поверхность стенки конструкции

В НТГДМ-технология при скоростях частиц, достигающих значений $V_p = 600 \dots 1200 \text{ м/с}$, динамическое давление в зоне контакта может достигать максимальных уровней порядка $\sim 10^{10} \text{ Па}$, что значительно превосходит предельные значения механических свойств большинства материалов. Установлено, 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). Это объясняется тем, что динамическое давление по своей природе оказывает существенное влияние на энергию активации поверхностей частиц и подложки в зоне соударения, что способствует образованию прочных химических связей [34].

4.3.1. Дробление частиц при ударе.

В том случае, когда на основании НТГДМ технологии происходит нанесение покрытий, соударение частиц с подложкой вызывает взаимную их сдвиговую деформацию; активизируются сопряженные поверхности, снимаются оксидные и прочие пленки. В таком случае, начинается физическое взаимодействие на основе высокого напорного давления. При диссипации кинетической энергии растет локальная температура частицы, подложки в месте удара. При таком раскладе образуются когезионные и высокие адгезионные свойства, а деформационное упрочнение по толщине покрытия повышает его качество.

Как известно, ударное приложение нагрузки вызывает образование в твердом теле ударных волн, их интерференцию [116, 118, 129]. Все эти сложные теплофизические процессы вызывают деформацию и дробление исходных частиц при ударе, т.е. повышает степень дисперсности порошка в покрытии. Процесс дробления частиц при ударе о подложку обнаружен в результате структурного анализа покрытий, сформированных частицами значительных размеров ($d_p > 20\text{мкм}$) [141].

На шлифах под микроскопом видно большое количество мелких кусочков субмикронного диапазона, которые заполняют промежутки между более крупными частицами, существенно увеличивая среднюю плотность покрытий и когезию.

Результаты исследования процесса дробления разнородных частиц при ударе о подложку приведено на рисунках 4.1 ... 4.4, а также и в таблице 4.

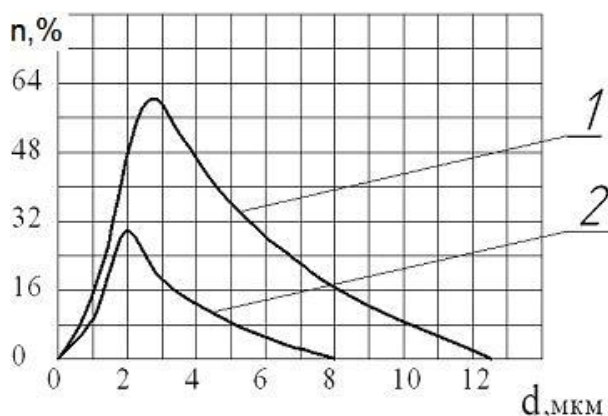


Рис 4.1. Изменение дисперсности частиц цинка при ударе:

1 - в исходном порошке, 2 - в покрытии, после удара о подложку

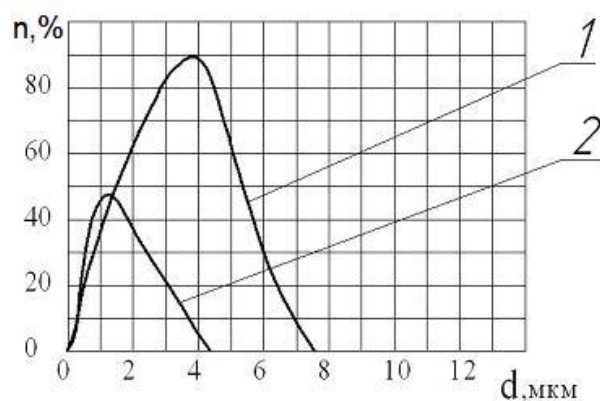


Рис 4.2. Изменение дисперсности частиц меди при ударе.

1 - в исходном порошке, 2 - в покрытии, после удара о подложку.

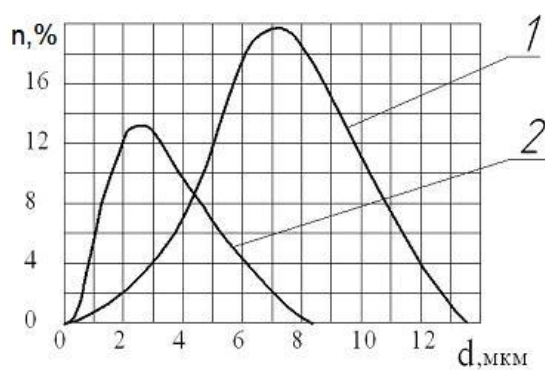


Рис 4.3. Изменение дисперсности частиц железа при ударе:

1 - в исходном порошке, 2 - в покрытии, после удара о подложку

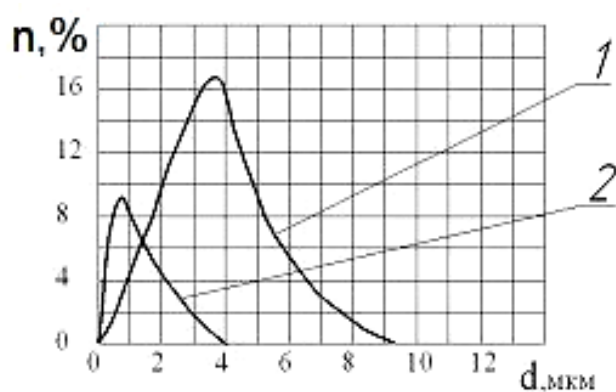


Рис. 4.4. Изменение дисперсности частиц никеля при ударе:

1 - в исходном порошке, 2 - в покрытии, после удара о подложку

Таблица 4

Относительное повышение дисперсности частиц N* после удара по сравнению с дисперсностью исходного порошка

Тип покрытия	N* раз	Тип покрытия	N* раз
Си	2,7	Со	1,3
Fe	2,3	Al	1,02
Ni	3,3	Zn	1,25

4.4. Анализ энергетического баланса в зоне удара частицы с поверхностью стенки конструкции

В символах уравнение баланса энергии в зоне удара можно представить в виде (4.5).

Так, в уравнении 4.5 явно не отражена энергия нагрева частиц в газовом потоке, а также не указана энергия нагревания подложки от газового потока. Такое положение дел объясняется тем, что заданные виды энергии принимаются во внимание в уравнении баланса параметрами, что описывают механические свойства материалов, как частиц, так и подложки.

Представим физическую сущность, а также математическое описание каждого члена в 4.5.

4.4.1. Алгоритм расчёта энергия частицы

Кинетическая энергия частицы в момент удара определяется массой m_p и скоростью частицы V_p и представляется в виде:

$$E_{\text{кин.р}} = \frac{m_p \cdot V_p^2}{2} \quad (4.15)$$

4.4.2. Энергия деформации частицы.

Речь идет об энергии, которая затрачена на пластическую деформацию частицы, которая бьется о подложку. Другими словами, эта энергия меняет форму частицы от сферической до такой, которая ближе к эллипсоидной. Форма, которая приближена к эллипсоидной, принимаемая частицей в момент удара по подложке, определена визуальным изучением лифов покрытий металлов при многократном их увеличении. Практика показывает, что форма

деформированных частиц, которые формируют собой покрытие, в ряде случаев близка к эллипсу, как показано на рисунке 4.5. Лишь при скорости в 1000 м в секунду примерно форма деформированной частиц приближается к дисковой.

С учетом того, что при ударе частица входит в подложку на несущественную глубину, логично допускать, что деформации частицы преимущественно сопровождаются сжатием их и растеканием по поверхности. Тут правильно говорить о том, что растекание частицы протекает без сопротивления со стороны внешней среды [42, 132].

Таким образом, определяющим механическим процессом в этом случае является процесс растекания, а не сжатия. Это значит, что энергия деформации частицы затрачивается на преодоление сил сопротивления текучести при деформации ее поверхности от исходной сферической формы (диаметра) d_p до сфероида (высота $2b$) (рисунок. 4.6).

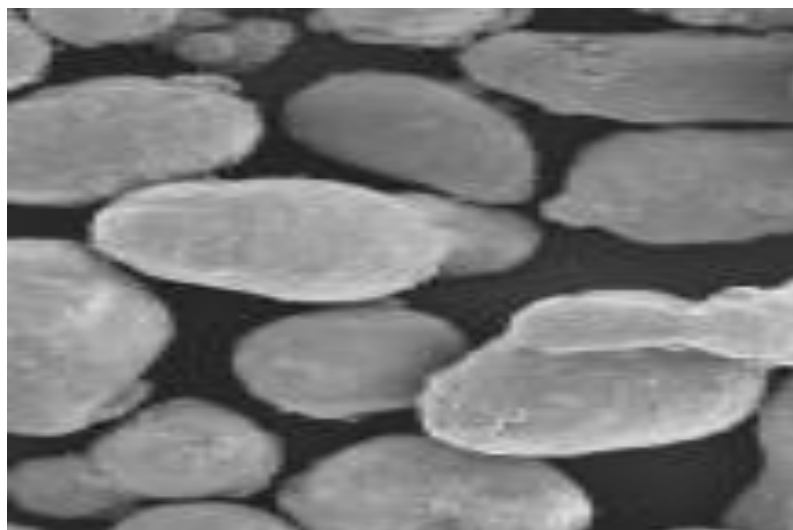


Рисунок 4.5. Форма деформированных частиц при формировании покрытия

Исходя из сказанного, энергию деформации частицы можно записать в виде:

$$E_{\text{деф. } p} = \sigma_T \cdot \Delta F_p (d_p - 2b_p) \quad (4.16)$$

где σ_T - предел текучести материала частицы, ΔF_p - изменение площади боковой поверхности частицы за счет деформации при ударе о подложку.

Очевидно, $\Delta F_p = F_{эл} - F_{сф}$. В свою очередь, боковая поверхность частицы сферической формы $F_{сф} = \pi d_{сф}^2$, а боковая поверхность эллипсоида равна:

$$F_{эл} = 2\pi a^2 + \frac{b^2}{\alpha} \ln \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \quad (4.17)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Преобразовав, получим:

$$\Delta F_p = \pi \left[2a^2 + \frac{b^2}{\alpha} \ln \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - d_{сф}^2 \right] \quad (4.18)$$

Подставив (4.18) в (4.16), получим:

$$E_{\text{деф. р}} = \pi d_p \cdot \sigma_T \left[2a^2 + \frac{b^2}{\alpha} \ln \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - d_{сф}^2 \right] (1 - \varepsilon) \quad (4.19)$$

где $\varepsilon = \frac{2b}{d_p}$ - степень деформации частицы при ударе, $2a$ и $2b$ – большая

и малая оси сфероида, соответственно (см. рис.4.6).

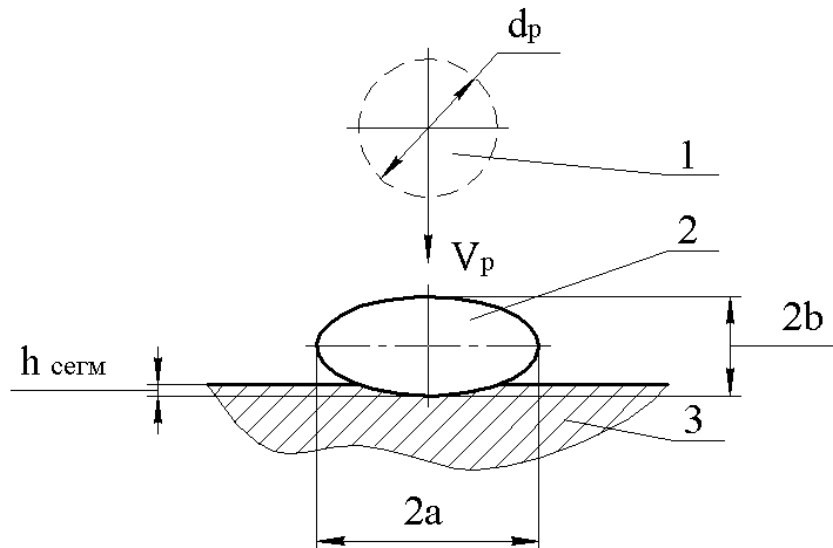


Рисунок 4.6. Деформации металлической частицы при ударе о твердую поверхность (подложку):

1– форма частицы до удара, R_{cf} - радиус, V_p - скорость частицы в момент удара о подложку, 2– сегментальная форма частицы после удара, $d_{деф}$ – $2b$ - диаметр сегмента, $h_{сегм}$ – глубина проникновения частицы в подложку

4.4.3. Оценка энергии деформации частицы в процессе удара

Это энергия, затрачиваемая на деформацию подложки. Физическим процессом при этом является пластическое сжатие материала подложки. Величина этой энергии определяется, главным образом, двумя факторами.

Глубиной проникновения частицы в тело подложки $h_{сегм}$ (рисунок. 4.6) и силой сопротивления сжатию материала подложки $\bar{P}_{сопр}$. В таком случае имеем:

$$E_{деф.подл} = \bar{P}_{сопр} \cdot h_{сегм} \quad (4.20)$$

Для приближенной оценки величины $h_{сегм}$ обратимся к одному из положений физики твердого тела, а именно к задаче определения твердости материалов по Бринеллю методом сферы [133]. В этом методе, как известно, применяется сфера, изготовленная из материала высокой твердости, чтобы исключить ее деформацию при ударе о подложку.

Очевидно, метод сферы Бринелля можно применить и к процессу формирования покрытий НТГДМ-технологией, поскольку проникновение частицы в тело подложки в этом процессе реализуется в основном на начальной стадии взаимодействия частицы с подложкой, когда деформация падающей частицы еще не существенная. При последующем развитии удара, частица сильно деформируется. Последнее вызывает резкое увеличение площади контакта частицы с подложкой, т.е. резкое увеличение сопротивления проникновению деформированной частицы в тело подложки. Это мгновенно тормозит процесс проникновения частицы в тело подложки. В силу указанного, можно с высокой достоверностью считать, что глубина проникновения $h_{\text{сегм}}$ частицы в тело подложки реализуется на начальной стадии удара. В таком случае, согласно Бринеллю имеем:

$$H_{\beta} = \frac{\bar{P}_{\text{сопр}}}{\pi d_p \left(d_p - \sqrt{d_p^2 - d_{\text{сегм}}^2} \right)} \quad (4.21)$$

где $\bar{P}_{\text{сопр}}$ - усредненная сила сопротивления, приложенная к частице со стороны подложки; d_p - диаметр частицы; $d_{\text{сегм}}$ - диаметр сегмента (углубления).

Используя далее (4.25), получим:

$$\bar{P}_{\text{сопр}} = \pi d_p \left(d_p - \sqrt{d_p^2 - d_{\text{сегм}}^2} \right) H_{\beta} \quad (4.22)$$

На рисунке 4.7 представлена геометрическая модель взаимодействия частицы с подложкой в начальный момент удара.

Тогда, для оценки глубины проникания частицы в материал, просто записать выражение в виде:

$$h_{\text{сегм}} = \frac{d_{\text{сф}} - \sqrt{d_{\text{сф}}^2 - d_{\text{сегм}}^2}}{2} \quad (4.23)$$

где $d_{\text{сф}} = d_p$ – диаметр частицы.

Используя (4.23) преобразуем (4.22) к виду:

$$\bar{P}_{\text{сопр}} = 2\pi h_{\text{сегм}} \cdot d_p \cdot H_\beta \quad (4.24)$$

Подставив (4.24) в (4.20), окончательно получим:

$$E_{\text{деф.подл}} = 2\pi h_{\text{сегм}}^2 \cdot d_p \cdot H_\beta \quad (4.25)$$

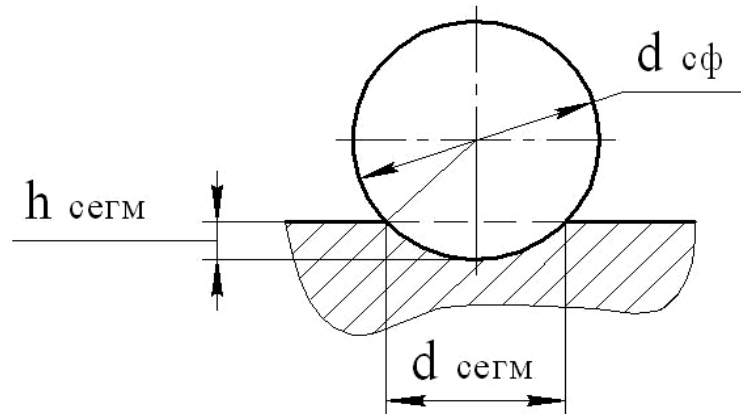


Рисунок 4.6. Определения микротвердости материала по Бринеллю:

$h_{\text{сегм}}$ – глубина проникновения частицы в подложку,

$d_{\text{сф}}$ – диаметр частицы перед ударом

4.4.4. Расчет энергии нагрева частицы и подложки.

Энергии, затраченные на нагревание частицы $E_{\text{наг.р}}$ и подложки $E_{\text{наг.под}}$, можно представить в следующем виде:

- для частицы:

$$E_{\text{наг.р}} = m_{\tau, \text{р}} \cdot c_p \left(\bar{T}_{\tau, \text{р}} - T_{\text{нач.р}} \right) \quad (4.26)$$

где $m_{\tau, \text{р}}$ – доля прогретой массы частицы за время удара τ , $\bar{T}_{\tau, \text{р}}$ – среднemasовая температура прогретого участка частицы, c_p – удельная теплоемкость материала частицы при температуре $\bar{T}_{\tau, \text{р}}$; $T_{\text{нач.р}}$ – средняя температура частицы перед ударом;

- - для подложки:

$$E_{\text{наг.подл}} = m_{\tau, \text{подл}} \cdot c_{\text{подл}} (\bar{T}_{\tau, \text{подл}} - T_{\text{нач. подл}}) \quad (4.27)$$

где $m_{\tau, \text{подл}}$ - доля прогретой массы подложки за время удара τ , $\bar{T}_{\tau, \text{подл}}$ - среднемассовая температура прогретого участка подложки, $c_{\text{подл}}$ – удельная теплоемкость материала подложки при температуре $\bar{T}_{\tau, \text{подл}}$, $T_{\text{нач. подл}}$ - температура подложки перед ударом.

Из теории нестационарной теплопроводности известно, что длина, на которую распространится температурная волна за время нагрева (время экспозиции) τ , определяется в виде $\delta = \sqrt{a \cdot \tau}$, где a - коэффициент температуропроводности тела. Тогда для процесса прогрева частицы за время удара (рисунок 4.7) имеем:

$$\delta_p = \sqrt{a_p \cdot \tau_{\text{уд}}} \quad (4.28)$$

где $\tau_{\text{уд}}$ - время удара, т.е. время, в течение которого частица деформируется от сферической формы до сфероидной, a_p - коэффициент температуропроводности материала частицы.

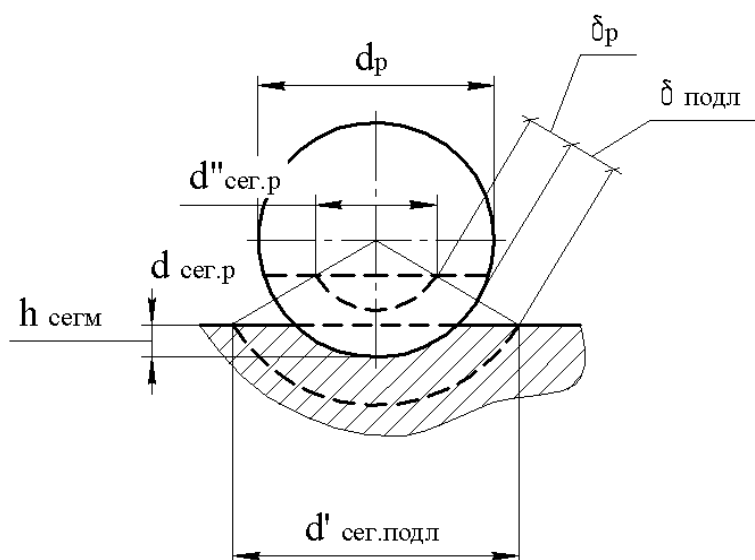


Рисунок 4.7. Схема прогрева частицы и подложки при их взаимодействии:

d_p - исходный диаметр частицы, $h_{\text{сегм}}$ - глубина проникновения частицы в подложку, $d'_{\text{сег. подл.}}$ - диаметр сегмента деформации подложки, $d_{\text{сег.р}}$ - диаметр прогретого сегмента частицы, $d''_{\text{сег.р}}$ - диаметр непрогретого сегмента частицы, $d'_{\text{сег.подл}}$ - диаметр прогретого сегмента подложки, δ_p - глубина прогрева частицы, $\delta_{\text{подл}}$ - глубина прогрева подложки

Для процесса прогрева подложки (рисунок. 4.7) имеем:

$$\delta_{\text{подл}} = \sqrt{a_{\text{подл}} \cdot \tau_{\text{уд}}} \quad (4.29)$$

Далее, используя (4.282) и (4.30) и рисунок 4.7, определим массы прогретых участков частицы и подложки.

Для частицы:

$$m_{\tau, p} = V_{\text{пр. р}} \cdot \rho_p \quad (4.30)$$

где $V_{\text{пр. р}}$ - объем прогретого сегмента частицы, ρ_p - плотность материала частицы.

Для подложки:

$$m_{\tau, \text{подл}} = V_{\text{пр. подл}} \cdot \rho_{\text{подл}} \quad (4.31)$$

где $V_{\text{пр. подл}}$ - объем прогретого участка подложки, $\rho_{\text{подл}}$ - плотность материала подложки.

В дальнейшем, с целью упрощения процедуры аналитических выкладок, будем считать, что форма частицы в момент прогрева сферическая. Очевидно, объем прогретого участка частицы (рисунок. 4.7) можно представить в виде:

$$V_{\text{пр. р}} = V'_{\text{пр. сег}} - V''_{\text{непр. сег}} \quad (4.32)$$

где $V'_{\text{пр.сег}}$ - объем прогретого сегмента частицы с диаметром основания d_p , $V''_{\text{непр.сег}}$ - объем непрогретого сегмента частицы с диаметром основания $d''_{\text{сег.р}}$. Тогда имеем:

$$V'_{\text{сег.р}} = \frac{1}{3} \pi h_{\text{сег}}^2 (3R_p - h_{\text{сег}}) \quad (4.33)$$

а также:

$$V''_{\text{непр.сег}} = \frac{1}{3} \pi \left\{ (h_{\text{сег}} - \delta_p) \left[3(R_p - \delta_p) - (h_{\text{сег}} - \delta_p) \right] \right\} \quad (4.34)$$

где δ_p - толщина прогретого слоя частицы за время удара $\tau_{\text{уд}}$. Преобразовав (4.34) с учетом (4.29) и малости значений $h_{\text{сег}}$ и δ_p , получим:

$$V''_{\text{непр. сег.}} = \pi R_p (h_{\text{сег.}} - \delta_p)^2 \quad (4.35)$$

Окончательно получим:

$$V_{\text{пр.р}} = 2\pi R_p \cdot \delta_p (h_{\text{сег.}} - \delta_p) \quad (4.36)$$

В итоге (4.30) принимает вид:

$$m_{\tau, p} = 2\pi R_p \cdot \delta_p (h_{\text{сег.}} - \delta_p) \cdot \rho_p \quad (4.37)$$

Далее, согласно рисунку 4.7, объем прогретого участка подложки можно представить в виде:

$$V'_{\text{пр.подл}} = V_{\text{сег.подл}} - V'_{\text{сег.р}} \quad (4.38)$$

где $V'_{\text{сег.р}}$ представлено соотношением (4.33), а $V_{\text{сег.подл}}$ - объем прогретого сегмента подложки с диаметром основания $d'_{\text{сег.подл.}}$.

Или:

$$V_{\text{сег.подл}} = \frac{1}{3} \pi (h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}})^2 \left[3(R_p + \delta_{\text{подл}}) - (h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}}) \right] \quad (4.39)$$

Подставив (4.39) и (4.33) в (4.38) и преобразовав с учетом малости значений δ_p , получим:

$$V_{\text{пр.подл}} = \pi R_p \cdot \delta_{\text{подл}} (3h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}}) \quad (4.40)$$

В итоге, согласно (4.31) и с учетом (4.30) и (4.29) масса прогретого участка подложки равна:

$$m_{\tau, \text{подл}} = \pi R_p \cdot \delta_{\text{подл}} (3h_{\text{сег.}} + \delta_{\text{подл}}) \cdot \rho_{\text{подл}} \quad (4.41)$$

Для оценки массы прогретых участков частицы и подложки необходимо рассчитать время удара.

4.4.5. Расчёт времени взаимодействия частицы с подложкой.

Экспериментально установлено (киносъемка) [132], что время растекания (деформации) жидкой частицы при ударе о твердую поверхность со скоростью $V_{0,p}$ оценивается по формуле:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{(d_p - h_{\text{деф}})}{V_{0,p}} \quad (4.42)$$

где $h_{\text{деф}}$ – конечная толщина деформированной частицы. Преобразовав, получим:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{d_p (1 - \varepsilon)}{V_{0,p}} \quad (4.43)$$

где ε - степень деформации частицы.

В случае взаимодействия твердой частицы с подложкой записанная формула должна быть модифицирована, так как скорость деформации твердой частицы не будет равна скорости движения частицы перед ударом, как это установлено для жидкой частицы. Очевидно, для твердой частицы справедливо соотношение:

$$\tau_{уд} = \frac{d_p (1 - \varepsilon_p)}{V_{\text{деф. р}}} \quad (4.44)$$

где $\varepsilon_p = \frac{2b}{d_p}$ - степень деформации твердой частицы (рисунок 4.6),

$V_{\text{деф.р}}$ - скорость деформации твердой частицы.

Логично предположить, что скорость деформации твердой частицы $V_{\text{деф. р}}$ будет отличаться от скорости деформации жидкой частицы $V_{0,р}$ на величину, представляемую отношением поверхностного давления $P_{\text{пов}}$ жидкой частицы, обусловленного поверхностным натяжением, к пределу текучести материала твердой частицы $\sigma_{Т, р}$, т. е.:

$$V_{\text{деф. р}} = V_{0, р} \frac{P_{\text{пов}}}{\sigma_{Т, р}} \quad (4.45)$$

где, для жидкой частицы сферической формы диаметра $d_{\text{жид.сф}}$, согласно уравнению Лапласа:

$$P_{\text{пов}} = \frac{4\sigma_{\text{пов}}}{d_p} \quad (4.46)$$

где $\sigma_{\text{пов}}$ - поверхностное натяжение жидкой частицы (Н/м).

Подставив (4.46) в (4.45) и далее в (4.44), окончательно получим:

$$\tau_{уд} = \frac{r_p^2 (1 - \varepsilon_p)}{V_{0, р} \frac{\sigma_{\text{пов}}}{\sigma_{Т, р}}} \quad (4.47)$$

Таким образом, согласно (4.47) оценку длительности удара частицы о подложку можно осуществить при известных значениях нескольких параметров, таких как:

- p
- скорость частицы в момент удара $V_{0р}$;

з

м

е

р

- степень деформации ε_p частицы (определяется экспериментально);
- поверхностное натяжение расплавленной частицы $\sigma_{\text{пов}}$ и предела текучести твердой частицы $\sigma_{\text{т,р}}$.
- Последний параметр, как известно, является функцией температуры частицы в момент удара T_p (справочные данные).

4.4.6. Итоговое уравнение баланса энергии.

Преобразуем выражение (4.5), подставив в нее выведенные зависимости. Тогда уравнение баланса энергии в зоне удара примет окончательный вид:

$$\begin{aligned} \frac{m_p \times V_p^2}{2} = \pi d_p \cdot \sigma_{\text{т}} \left[2a^2 + \frac{b^2}{\alpha} \ln \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - d_p^2 \right] (1 - \varepsilon_p) + \\ + 2\pi h_{\text{сег.}}^2 \cdot d_p \cdot H_{\beta} + m_{\text{т,р}} \cdot c_p (\bar{T}_{\text{т,р}} - T_{\text{нач.р}}) + \\ + m_{\text{т,подл}} \cdot c_{\text{подл}} (\bar{T}_{\text{т,подл}} - T_{\text{нач.подл}}) \end{aligned} \quad (4.48)$$

Уравнение (4.48) с учетом (4.37), (4.42) и (4.47) дает возможность рассчитать в среднемассовые температуры прогретого участка частицы, а также среднюю температуру прогретого участка подложки зоне контакта при ударе. При этом должны быть известны:

- дисперсность порошка (диапазон изменения диаметров частиц d_p) в составе порошка (данные сертификата порошка);
- род материала порошка и подложки (теплофизические и механические свойства этих материалов – табличные данные);
- скорости частиц всех размеров в составе порошка в момент удара о подложку V_p (рассчитываются);
- степень деформации всех частиц порошка ε_p (определяется экспериментально)

Следует при этом иметь в виду, что локальные средние значения температур прогретых участков частицы и подложки не равны друг другу, однако различие между ними может быть не значительным в связи с тем, что

время удара мало. По оценкам с использованием формулы (4.47) время удара $\tau_{уд} = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ с. Поэтому в инженерных расчетах можно с достаточной точностью принять, что температуры прогретых участков частицы и подложки равны между собой.

Таким образом, определение всех значений указанных выше температур прогретых участков частицы и подложки сводится к решению задачи газовой динамики и межфазного теплообмена в процессе течения неизотермической гетерогенной смеси на всей длине газодинамического тракта стенда.

Выводы по главе 4

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.;

торая критическая скорость — это скорость частицы, при которой твердая поверхность начинает механически разрушаться в результате бомбардировки её частицами, что приводит к процессу эрозии подложки.

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. Когда растет скорость частиц, то кинетическая их энергия достигает таких больших параметров, когда механизм контактного влияния частицы на подложку будет сильно трансформирован, 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.

приведено уравнение баланса энергии в зоне удара частицы с подложкой, с математическим и физическим описанием каждого члена.

ГЛАВА 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ.

Накопленный многолетний опыт разработки и совершенствования «Низкотемпературного газодинамического метода» в МАИ, а также исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными [142] по исследованию «Холодного газодинамического метода» («Cold Spray») [5, 6, 167], позволяют провести некоторый системный анализ полученных результатов как в научном, так и в прикладном плане.

В данной главе приведены характеристики защитных покрытий, полученных в МАИ с применением НТГДМ – технологий.

5.1. Воздействие процесса формирования термостойких покрытий на механические свойства поверхностного слоя материалов конструкции изделия.

Статические испытания механических свойств образцов с покрытиями и без покрытий проводились во Франции, г. Вернон, в «Национальной научно-исследовательской лаборатории ракетных двигателей». При этом использовались стандартные типы образцов, которые, как правило, применяются для проведения подобных испытаний (рисунок 5.1).

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 5.1).

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, варьировалась 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.

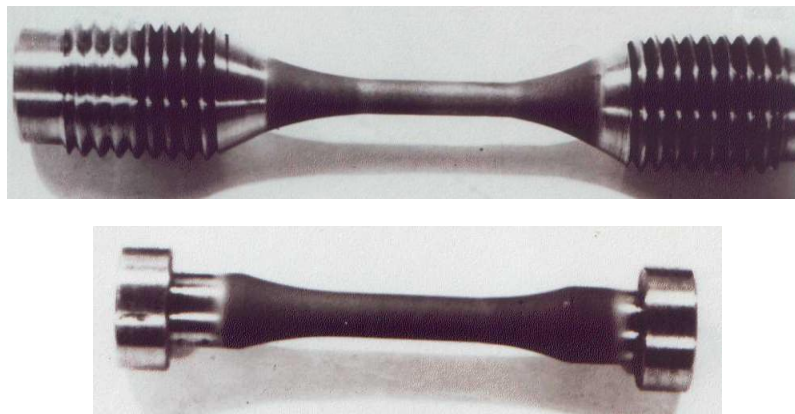


Рисунок 5.1. Фотографии медных образцов с покрытием из карбида ниобия NbC для испытаний механических свойств

Цель указанных исследований заключалась в том, чтобы выявить влияние разных по композиции покрытий на основные механические характеристики образцов. Материалы штатных образцов выбирались аналогичными тем, которые применяются в производстве Европейского космического агентства (ESA) в качестве внутренних стенок кислородо - водородных ЖРД. В частности, одним из штатных материалов для образцов была взята медь марки М 1 (Россия), а также сплав на основе меди CuAgZr (ESA).

Результаты исследований приведены на рисунках 5.2, 5.3 и 5.4, где 1 – Медь М1 (Россия) с покрытием NbC, 2 – сплав CuAgZr (ESA) без покрытия, 3 - сплав CuAgZr с покрытием NbC, 4 - сплав CuAgZr с покрытием NiAl + NbC + Si (NiAl – интерметаллид), 5 - - сплав CuAgZr с покрытием NiAl + NbC + Si (NiAl – плакированный), 6 - - сплав CuAgZr с покрытием Al₂O₃ + MgO Al₂O₃ + Cr + Si

Анализ полученных при исследовании данных показал значительное влияние покрытий на изменение механических свойств штатных образцов. Установлено, что сравнительно тонкий поверхностный слой покрытия из карбида ниобия (NbC) толщиной ~ 40 мкм заметно влияет на статическую прочность образца из CuAgZr диаметром 5 мм. Например, (рисунок 5.2) если при криогенных температурах напряжения разрыва σ_B указанного материала с покрытием и без него совпадают, то в области повышенных температур (700K) σ_B материала с покрытием возрастает до 20%

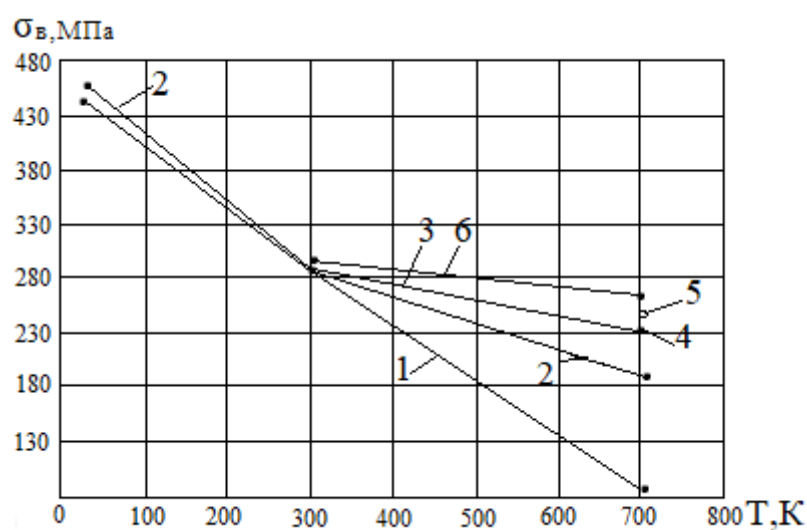


Рисунок 5.2. Изменение напряжения разрыва от температуры для образцов с покрытием и без покрытия.

Иначе оказывает влияние покрытие на предел упругости $\sigma_{0,2}$ материала (рисунок 7.3). В установленном в эксперименте диапазоне изменения температуры (от 20K до 700K) $\sigma_{0,2}$ образца с покрытием на 10...20% ниже аналогичного параметра для образца без покрытия. Однако, не смотря на снижение предела упругости, его уровень остается достаточно высоким, удовлетворяющим требованиям для конструкционных материалов.

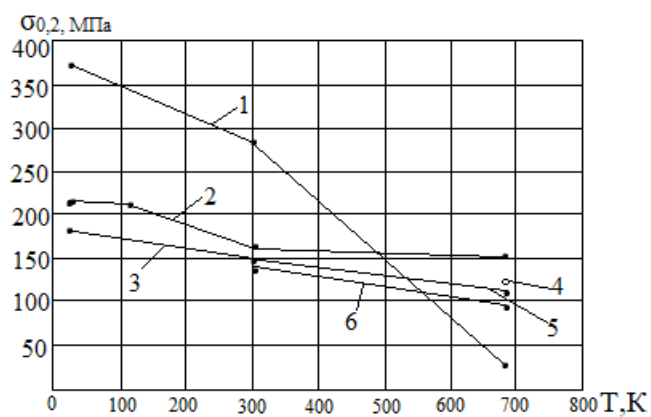


Рисунок 5.3. Изменение предела упругости от температуры для образцов с покрытием и без покрытия.

На рисунке 5.4 приведены данные испытаний штатного материала CuAgZr с покрытием и без покрытия. Видно, что относительные удлинения штатного образца и образца с покрытием заметно отличаются только в области криогенных температур (20...200K), где анализируемый параметр для образца с покрытием возрастает по сравнению со штатным образцом на 20%.

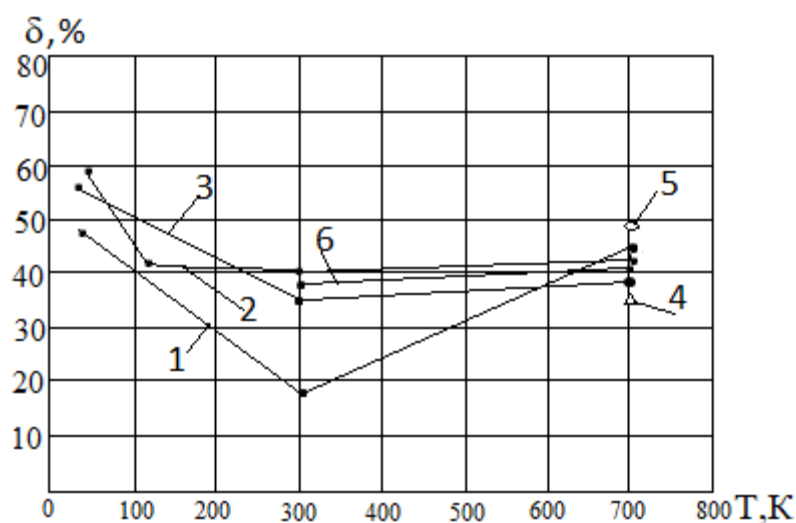


Рисунок 5.4. Изменение относительного удлинения образцов с покрытием и без покрытия от температуры.

На указанных выше рисунках приведены также механические характеристики образцов CuAgZr с нанесенными на них композиционными покрытиями класса металлокерамических (керметов), синтезируемых НТГДМ-технологией. Исследования проведены при температуре 700K.

Видно, что композиционные покрытия оказывают заметное влияние на механические свойства штатного материала CuAgZr. Причем композиты разных составов по-разному влияют на изменение свойств. Это указывает на тот факт, что, нанося с использованием НТГДМ – технологии покрытия из разных композиций, можно изменять механические свойства конструкционных материалов, добиваясь их необходимого уровня.

Испытания показали, что предел прочности σ_B при температуре 20К у образцов с покрытиями увеличивается на 15...20%. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ в 2.58 раза, модуль упругости E 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. Серия испытаний по выявлению влияния покрытий на изменение механических свойств материалов подложки завершалась исследованием этой особенности на образцах из электролитической меди М1. Результаты испытаний на статическую прочность медных образцов с покрытием из NbC и без покрытия приведены в таблице 5.

Таблица 5 Результаты испытаний на статическую прочность медных образцов с покрытием из NbC и без покрытия

Вид образца	Температура испытаний, Т	Предел прочности σ_B	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Модуль упругости E	Относ. удлинение при разрыве, δ
-----	К	МПа	МПа	МПа	%
Образец без покрытия.	20	376	127	100000 98000	80
	300	288	86		85
Образец с покрытием из NbC	20	448	328	157000 154000	47
	300	440	317		49

Как и ранее, испытания на статическую прочность проводились по классической методике. При этом на стандартные образцы из меди М1 наносилось покрытие из карбида ниобия, NbC. Толщина покрытия на образцах находилась в пределах 40 мкм. Некоторые механические характеристики

образцов с покрытием из карбида ниобия (NbC) приведены в таблице 5 и гистограмме рисунке 7.5.

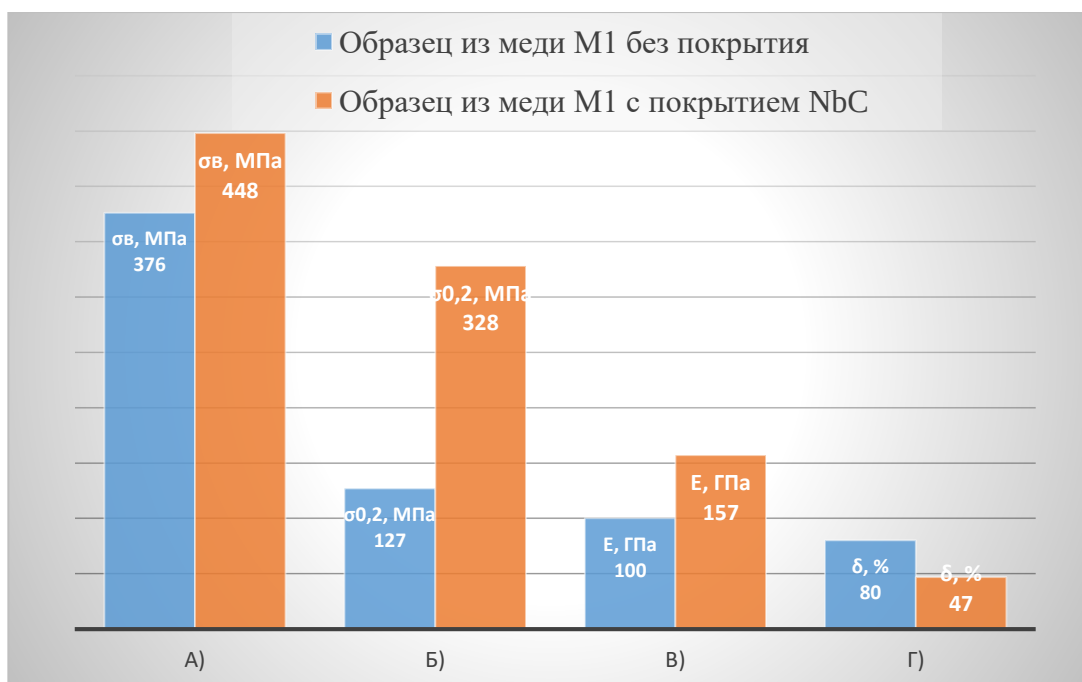


Рис. 5.5. Диаграмма механических свойств образцов с покрытием и без покрытия: А) – предел прочности, МПа; Б) – предел текучести, МПа; В) – модуль упругости, ГПа; Г) – относительное удлинение, %.

Дать строгое научное обоснование обнаруженным при испытаниях особенностям поведения механических характеристик штатного образца с покрытием сегодня не представляется возможным, поскольку это должно стать предметом исследования специалистов - материаловедов.

Объяснение выявленного влияния покрытий на изменение механических свойств образцов эффектом наклепа на наш взгляд является не убедительным.

Можно предположить, что установленный эффект изменения свойств материалов с покрытием, обусловлен механизмом взаимодействия высокоскоростных частиц малой дисперсности с подложкой. В частности, сверхвысокой концентрацией удельной энергии в зоне удара. Последнее вызывает появление новых ударных процессов, например, динамической

твердофазной диффузии [2,3] которая на несколько порядков протекает более интенсивно, чем твердотельная термодиффузия [4].

Эффект влияния покрытий на механические свойства материалов основы обнаружен другими авторами при проведении подобных исследований [150]. В работе отмечается, что покрытия из нитрида титана (TiN) и карбонитрида титана (TiC_xN_y) существенно повышают микротвердость и износостойкость поверхностей деталей.

5.2. Характеристики ряда термостойких покрытий в условиях воздействия кислородо – водородного высокотемпературного потока

По описанной в разделе 2.4.5 методике проведены экспериментальные исследования жаропрочности и термостойкости 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. 5.6 и 5.7) и охлаждаемые (при испытании покрытий на термостойкость, рис. 5.8 и рис. 5.9).

Композиционный состав покрытий «набирался» из порошков оксидов, карбидов и металлов разной дисперсности в соответствующих пропорциях по массовым долям. В качестве наполнителя в составе композиционного покрытия использовался пластичный металл, как правило, кремний Si. Спектр состава покрытий выбирался обоснованно, с учетом предполагаемых заранее функциональных характеристик каждого из компонентов. Например, введение в состав композита порошка кремния обосновано его способностью к интенсивному окислению с образованием на поверхности покрытия тонкой пленки расплава SiO_2 . Мгновенное образование пленки на поверхности в дальнейшем обеспечивала блокировку диффузии кислорода в объем покрытия, что делало покрытие термостойким.

Полидисперсность порошка каждого из компонентов обуславливается основными положениями, полученными в результате теоретического анализа, изложенного в главах 3 и 4.

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.

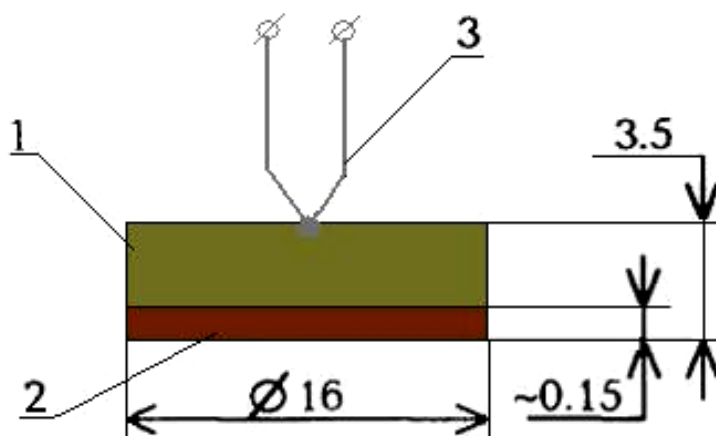


Рисунок 5.6. Схема образца для испытания для жаропрочности покрытия: 1 - стенка из ниобия; 2 - композиционное покрытие; 3 - платина - платинородиевая термопара.

Методика испытаний сводилась к следующему. На первом этапе исследования с целью определения удельного теплового потока q_w к стенке неразрушаемой модели предварительно проводилось калориметрирование кислородо - водородного потока на выбранном режиме работы плазмотрона

(постоянная мощность). Схема модели для испытаний приведена на рисунке 5.6.

Во время эксперимента проводилось измерение температуры задней стенки $T_{з.ст.}$ с помощью специальной платина-платина-родиевой термопары и температуры поверхности покрытия T_w (передней стенки) методом электроннооптической пирометрии.

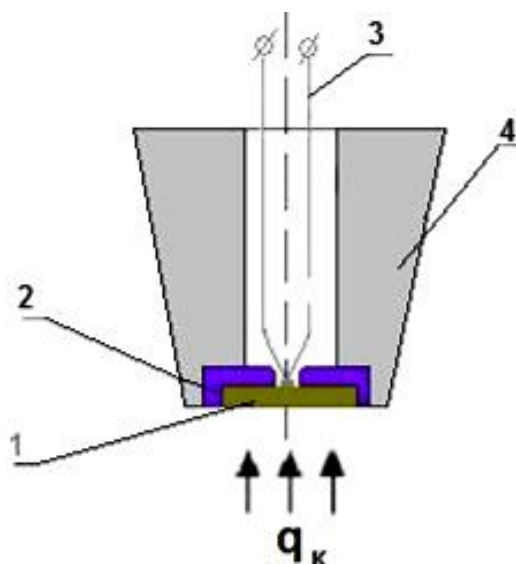


Рисунок 5.7. Схема модели для испытания на жаропрочность покрытий: 1 – образец из ниобия с покрытием; 2 – втулка из карбида бора (BC); 3 – платина — платинородиевая термопара; 4 – обтекатель из графита; q_w — конвективный тепловой поток

Регистрация показаний термопары и пирометра осуществлялась либо на осциллографе, либо на ЭВМ. Огневые испытания образцов проводились при разных значениях q_w . Результаты испытаний неохлаждаемых образцов из ниобия с двумя типами термостойких покрытий приведены в таблице 6.

Таблица 6 Результаты испытаний неохлаждаемых образцов из ниобия с двумя типами термостойких покрытий.

№ образца	q_w	$T_{з.ст.}$	Время испытания	Композиционный состав покрытия
-----	кВт/м ²	К	сек	-----
5	300	1420	22	MoSi ₂ – подслон. Al ₂ O ₃ +MgO Al ₂ O ₃ + Cr+Si - покрытие
7	1000 1250 1500 1800	1450 1600 1700 1820	14,0 12,0 10,8 7,8	NbC + NiAl + Cr+Si
8	1500 1880	1870 2000	11,4 6,0	MoSi ₂ – подслон. Al ₂ O ₃ +MgO Al ₂ O ₃ + Cr+Si - покрытие

После проведения испытаний неохлаждаемых образцов (№ 5,7,8, таблица 6) не обнаружено нарушений сплошности покрытия, его расплава, уноса массы и других дефектов.

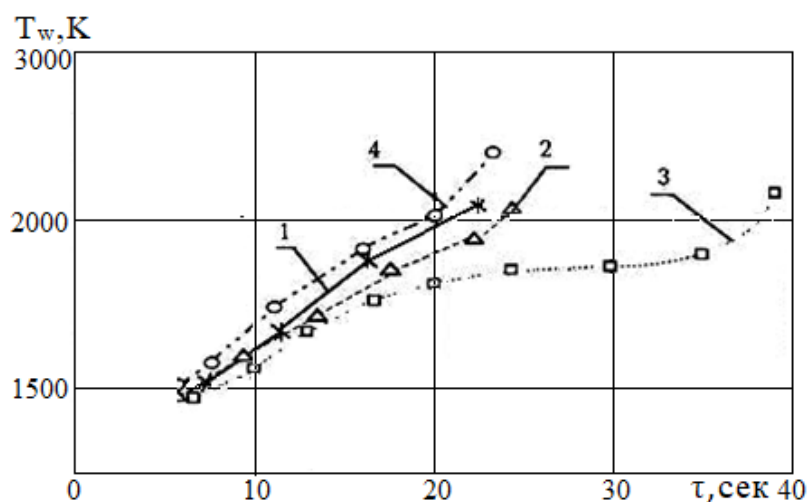


Рисунок 5.8. Изменение температуры передней поверхности T_w покрытий за время экспозиции тепловым потоком плотностью $q_w = 2500 \text{ кВт/м}^2$:

- 1 – композиционное покрытие NbC + NiAl + Si (1),
- 2 - композиционное покрытие NbC + NiAl + Si(2),
- 3 - композиционное покрытие NbC + NiAl + плакировка Si,
- 4 – композиционное покрытие $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr} + \text{Si}$.

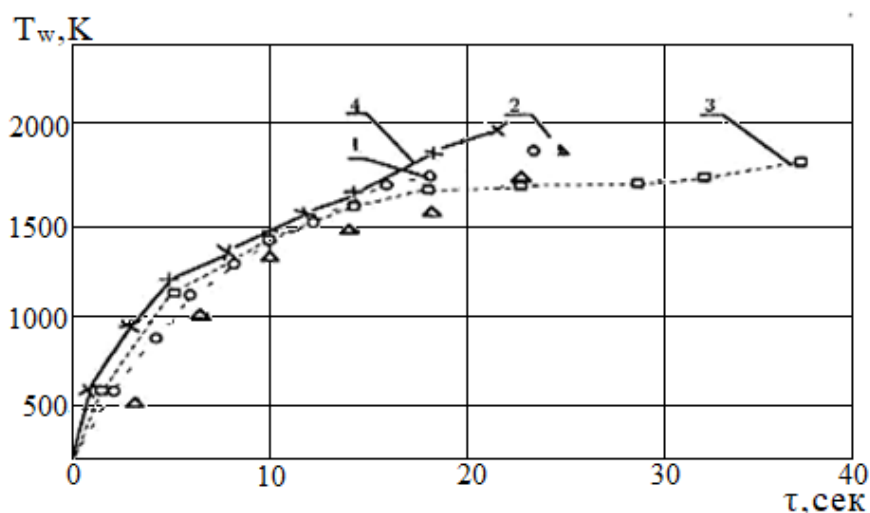


Рисунок 5.9. Изменение температуры задней поверхности покрытий $T_{з.ст.}$ за время экспозиции тепловым потоком плотностью $q_w = 2500 \text{ кВт/м}^2$:

- 1 – композиционное покрытие NbC + NiAl + Si (1), 2 - композиционное покрытие NbC + NiAl + Si(2), 3 - композиционное покрытие NbC + NiAl + плакировка Si, 4 - композиционное покрытие $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr} + \text{Si}$

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 7.7), 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 5.8 и рисунке 5.9. Как и предполагалось, наиболее термостойкими оказались композиции покрытий на образцах №3 и №4.

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 изготавливалась из медной трубки диаметром $d = 14$ мм. Средняя часть трубки профилировалась в виде прямоугольного участка площадью $S = (20 \times 10)$ мм². На эту площадку наносилось композиционное покрытие. Схема такой модели приведена на рисунке 5.10.

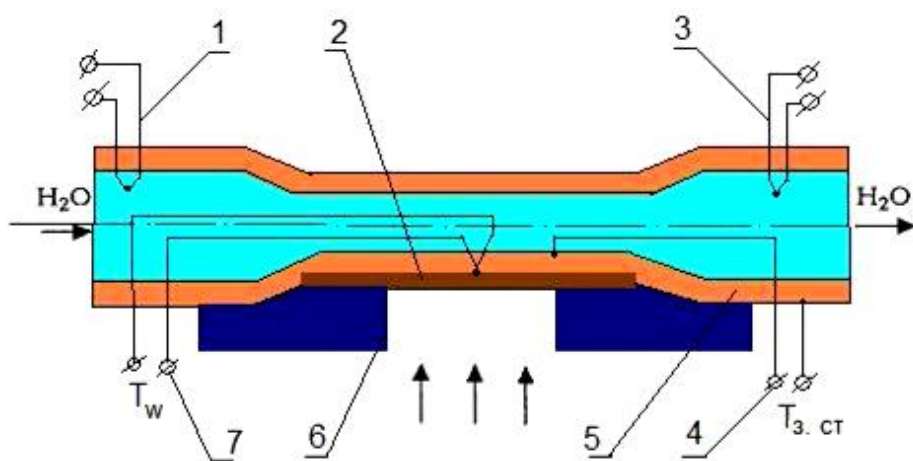


Рисунок 5.10. Охлаждаемая модель для исследования жаропрочности покрытий в высокотемпературном кислородо-водородном потоке.

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 (BC); 7 - хромель - алюмелевая термопара.

Для определения температуры передней T_w и задней стенки $T_{з.ст}$ 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 изготовлялось отверстие для королька термопары. Оно развальцовывалось, устанавливалась термопара, после чего корольек термопары зачеканивался в развальцованном отверстии. При этом тепловоспринимающая поверхность королька термопары делалась плоской (рисунок 5.11, позиция 2).

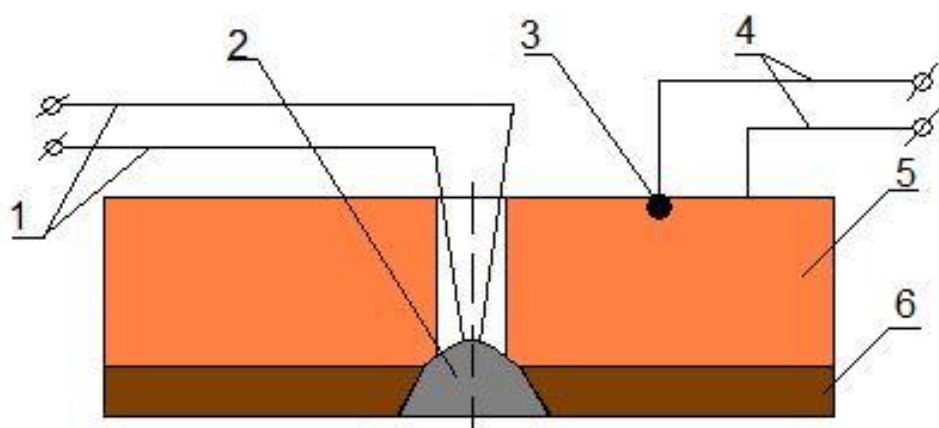


Рисунок 5.11. Схема заделки термопар в исследуемый образец.

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

На заднюю, омываемую водой поверхность устанавливалась медь – константановая термопара, с диаметром королька $d = 0.3$ мм. Вторым проводником для константановой термопары является медный корпус охлаждаемой модели, рисунок 5.11.

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 $F = (20 \times 10) \text{ мм}^2$.

Во время проведения испытаний регистрировался расход воды, $\text{м}^3/\text{сек}$ через охлаждаемую модель.

Результаты огневых испытаний охлаждаемых образцов с термостойкими покрытиями в диссоциированном кислороде - водородном потоке при разных уровнях удельного теплового потока q_w приведены в таблице 7.

Таблица 7 Результаты огневых испытаний, охлаждаемых образцов с разными покрытиями в диссоциированном кислороде - 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	58,8	447	424	15,0
	12,0	58,8	580	456	48,0
	25	90	560	510	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.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования жаропрочности и термостойкости покрытий позволили установить их эксплуатационные характеристики. Кроме того, используя полученные экспериментальные данные, в работе удалось провести классификацию исследованных покрытий для разных условий их эксплуатации (интенсивный нагрев в агрессивных высокотемпературных средах).

Выводы по главе 5

рассмотрены проведённые ранее испытания по определению влияния нанесённых покрытий на механические свойства материалов. Отмечено, что покрытия оказывают значительное влияние на изменение механических свойств штатных образцов. 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 σ_b указанного материала с покрытием и без него совпадают, то в области повышенных температур (700K) σ_b материала с покрытием возрастает до 20%.

рассмотрены проведённые испытания на жаропрочность и термостойкость нескольких типов композиционных покрытий при воздействии на них высокотемпературного кислородо – водородного потока.

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, газоплазменным 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 плотность 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:

- а. первая критическая скорость — это предельная скорость частицы, при которой происходит упругий удар.;
- б. 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 (700K) $\sigma_{\text{в}}$ материала с покрытием возрастает до 20%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. «Порошковая металлургия и напыленные покрытия». Под ред. Б.С. Митина. - М.: Металлургия, 1987. 791 с.
2. Борисов Ю.С. «Современные достижения в области нанесения защитных и упрочняющих покрытий». Жур. «Порошковая металлургия», 1993. № 7. с. 5...10.
3. Никитин П.В. «Тепловая защита» Учебник Высшей школы. МАИ, 2006г., 510 с.
4. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д. Л. «Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке». Изд. Янус-К, Москва 2007г., с 392.
5. Алхимов А.П., Папырин А.Н. и др. «Способ получения алюминиевых покрытий» Авторское Свидетельство. № 1618782 от 17.11.1983. Авторское Свидетельство № 1618777, 1986. Авторское Свидетельство № 1618778, 1986. Авторское Свидетельство № 1603581, 1987. Авторское Свидетельство № 1773072, 1987.
6. Алхимов А.П., Папырин А.Н. и др. Европейский патент, № 0484533, 1992. Патент США, №5302414, 1994
7. Никитин П.В., Дикун Ю.В., Фролов Ю.П. «Способ получения покрытий». Патент RU № 2082823 от 17.06.91.
8. Никитин П.В., Пайко В.В. «Расчет течения сверхзвуковых двухфазных гетерогенных потоков». Деп. в ВИНТИ № 2259 - В96, 1996. 11 с.
9. Никитин П.В., Пайко В.В., Фролов Ю.П. Способ и устройство для нанесения защитных покрытий. Деп. В ВИНТИ № 2260 – В96, 1996,
10. Андреев Н.А., Никитин П.В., Пайко В.В., Смолин А.Г. «Низкотемпературный газодинамический метод синтеза новых многофункциональных покрытий с предсказуемыми теплофизическими свойствами». Доклад. Международный Аэрозольный симпозиум IAS - 3. - Москва, 2...5 декабря, 1996, с.5

11. Никитин П.В., Фролов Ю.П. «Синтез композиционных материалов и многофункциональных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом». Доклад на 3-ей Российско-китайской научной конференции "Aero and Space Engines". - Красноярск, 1993, с3.
12. Никитин П.В. "Нанесение жаро - и термостойких покрытий на конструкционные материалы". Научно - технический семинар на фирме СЕП. Франция, Вернон, 1993 г.
13. Никитин П.В., Фролов Ю.П. «Структура и свойства газодинамических покрытий». Доклад. 2-ой Минский международный форум по тепло - и массообмену. - Минск, 1992. с. 93...99.
14. Никитин П.В. и др. «Алгоритм расчета двухфазных течений с учетом трения и теплообмена». Научно - технический семинар с участием фирмы SEP (Франция). - Москва, МАИ, 1994 г.
15. Никитин П.В., Пайко В.В., Смолин А.Г., Фролов Ю.П. «Закономерности формирования и свойства газодинамических покрытий». Доклад. 3-ий Минский международный форум по тепло - и массообмену. Минск, 1996, с.63...68.
16. Андреев Н.А., Давыдов Н.Н., Никитин П.В., Смолин А.Г. «Автоматизированный комплекс сбора и обработки экспериментальных данных при исследовании процессов тепломассообмена в гомогенных и гетерогенных высокотемпературных газовых потоках». Доклад. 3-ий Минский международный форум по тепло - и массообмену. Минск, 1996, с.121...125
17. Nikitin P.V. «Heat Protection of Spacecrafts». Report of Second Russian - Chines Scienific Conference "Aero - and Space Engines Power Plants". Moscow, 1992, 8с.
18. Nikitin P.V. «Using of Supersonic Low Temperature Heterogeneous Flows for Multi — Functional Coatings Creation». Report of "The VIII Symposium on Heat and Mass Transfer". Poland, Bialowieza, September, 1992, с. 73...79.
19. Nikitin P.V. «Problem issues of development Thermal Protection Systems for Spacecraft». The paper of the First International Conference on Aerospace Heat Exchanger Technology, Palo Alto, California, USA. February, 1993, с. 56...60.

20. P. Nikitin. «The Thermal Protection Systems for Spacecraft». The paper of The 6-th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering. Seoul, Korea, May, 1993, с. 42...47.

21. P. Nikitin. Heterogeneous Flows Method for Synthesis of the Composite Materials and Multi Functional Coating with the Predicted Thermo - physical Characteristics. The Paper of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 94. Denpasar, Bali, Indonesia, December 1994, с.51...56.

22. Nikitin P.V., Andreev N.A., Paiko V.V. «Low Temperature Gas Dynamic Method for Synthesis of The New Composite Materials and Multi — Functional coatings with the Predicted Thermophysical Characteristics». Report of "Thirteenth National Heat and Mass Transfer Conference". India, December, 1995, с. 34...38.

23. Никитин П.В., Степаненко С.А. «Низкотемпературный газодинамический метод формирования многофункциональных покрытий на поверхности конструкций» Доклад. 5-ая международная конференция Авиация и космонавтика- МАИ 2006.

24. А. Г. Стромберг, Д.П. Семченко. «Физическая химия» – М.: Высшая школа, 1973. 480 с.

25. Евсеев Г.Б., Глизманенко Д.Л. «Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов». — М.: Машиностроение, 1974. 308 с.

26. Катц Н.В., Антошин Е.В. «Металлизация распылением». - М.: Машиностроение, 1966. 198 с.

27. Линник В.А., Пекшев П.Ю. «Современная техника газопламенного нанесения покрытий». - М.: Машиностроение, 1985. 125 с.

28. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.А., и др. «Газотермические покрытия из порошковых материалов»: /Справочник/ - Киев, "Наукова Думка", 1987. 544 с.

29. Кудинов В.В. «Плазменные покрытия».- М.: Наука, 1977. 183 с.

30. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. и др. « Нанесение покрытий плазмой». — М.: Наука, 1990. 407 с.

31. Костиков В.И., Шестерин Ю.А. «Плазменные покрытия». - М.: Металлургия, 1978. 169 с.
32. С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. «Детонационные покрытия в машиностроении». - Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
33. Зверев А.И., Шаривкер Е.А., Астахов Е.А. «Детонационное напыление покрытий». — Л.: Судостроение, 1979. 231 с.140
34. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. «Физико-химические основы детонационно - газового напыления покрытий». - М.: Наука, 1978. 223 с.
35. Гинзбург Б.Г. «Формирование контактной зоны покрытие - подложка при газотермическом напылении». Порошковая металлургия, 1986. № 10. с. 47...50.
36. Харламов Ю.А. «Классификация и критерии оценки качества процессов нанесения покрытий из порошковых материалов». Порошковая металлургия, 1984. № 4. с. 87...90.
37. Пекшев П.Ю. «Новые направления в развитии оборудования для газотермического нанесения покрытий». Институт металлургии им. А.А. Байкова АН СССР.
38. «Газотермические способы нанесения защитных покрытий»: Темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехнический институт им. К.Э. Циолковского.- Челябинск, 1986. 103 с.
39. Хасуй Ацусси. «Техника напыления». Перевод с япон. С.Л. Масленникова. — М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
40. «Современные достижения в области техники и применения газотермических и вакуумных покрытий»: Сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. — Киев: ИЭС, 1991. 162 с.
41. Харламов Ю.А. «Классификация видов взаимодействия частиц порошка с подложкой при нанесении покрытий». Порошковая металлургия, 1988. №1. с. 18...21.
42. Харламов Ю.А. «Механизм пластической деформации при формировании газотермических покрытий». Порошковая металлургия, 1981. №12. с 31...35.

43. Черноиванов В.И., Каракозов Э.С. «Физико-химические процессы образования соединения при напылении порошковых покрытий». Сварочное производство, 1984. №1. с.2...5, №2. с. 10...14, №3. с. 29...31.
44. Каракозов Э.С. «Соединение металлов в твердой фазе». - М.: Металлургия, 1976. 264 с.
45. Кудинов В.В. «Нанесение покрытий напылением». М.: Наука, 1992. 432 с.
46. Никитин П.В., Дикун Ю.В., Смолин А.Г. «Устройство для нанесения защитных покрытий» Патент RU, №2089665 от 23.06.1995.
47. Меснянкин С.Ю., Никитин П.В. «Система диагностики высокотемпературных газовых потоков». Учебное пособие. — Москва, МАИ, 1991. 56с.
48. Давыдов Н.Н., Зайцев К.С., Никитин П.В. «Универсальный зонд для температурной диагностики ионизированных газовых потоков высокой скорости». Доклад 2 —ой Минский международный форум по тепло - и массообмену. — Минск, 1992.
49. Пилипенко Н.В., Пильщиков Г.В., Шевнина Е.И. «Диагностика дисперсных энергетических установок». Доклад на 1-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНТК). Москва, 21...25 ноября 1994.
50. Полежаев Ю.В., Шишков А.А. «Газодинамические испытания тепловой защиты»: Справочник. — М.: Промедек, 1992. 248 с.
51. Лавренчик В.Н. «Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов». М.: Энергоатомиздат, 1986, 269 с.
52. Стутшн Ю.В. «Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ». - М.: Энергоатомиздат, 1983. 288 с.
53. Латыев Х.И., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н. «Излучательные свойства твердых материалов». Справочник. Под общ. ред. А.Б. Шейндлина. - М.: Энегия, 1974. 471 с.

54. В.К. Абгарян, Н.Н. Давыдов, Е.Р. Кубяк и др. «Техника теплофизического эксперимента»: Учебное пособие к лабораторным работам / - М.: МАИ, 1991. 59 с.
55. Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников, Н.С. Идиатуллин и др. «Теория и техника теплофизического эксперимента». Учеб. пособие для инженеров физических и энергомашиностроительных спец. вузов /; Под ред. Щукина В.К./ - М.: Энергостромиздат, 1985. 360 с.
56. П.В. Новицкий, И.А. Зограф, В.С. Лабхнец. «Динамика погрешностей средств измерений». -Л.: Энергоатомиздат, 1990. 191 с.
57. Новицкий П.В. «Оценка погрешностей результатов измерений». - Л.: Энергоатомиздат, 1991. 190 с.
58. Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. «Автоматизация физического эксперимента». - М.: Энергоатомиздат, 1986. 367 с.
59. «Измерения в промышленности». Справочник: В 3 кн./ Под ред. П. Профоса; Перевод с немецкого под ред. Д.И. Агейкина. - М.: Металлургия, 1990.
60. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. «Сплавы для термопар». Справочник. — М.: Металлургия, 1983. 360 с.
61. Гордов А.Н., Жугалло О.М., Иванова А.Г. «Основы температурных измерений». - М.: Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
62. Земельман М.А. «Метрологические основы технических измерений». - М.: Изд—во стандартов, 1991. 227 с.
63. Б.Н. Олейник и др. «Приборы и методы температурных измерений». [Учеб. пособие для. сред. спец. учеб. заведений по специальности "Электро-теплотехнические измерения". - М.: Из - во стандартов, 1987. 295 с.
64. Дейч М.Е. «Техническая газодинамика». - М.: Госэнергоиздат, 1961. 592 с.
65. Петунин А.Н. «Методы и техника измерений параметров газового потока». — М.: Машиностроение, 1972. 332 с.
66. Чернин СМ., Коган А.В. «Измерение температуры малых тел пирометрами излучения». - М.: Энергия, 1980. 95 с.

67. Кунце Х.И. «Методы физических измерений». - М.: Мир., 1989. 213 с.
68. Е.С. Платунов, СЕ. Буровой, В.В. Курепин, Г.С. Петров «Теплофизические измерения и приборы». Под. общ. ред. Е.С. Платунова. — Л.: Машиностроение, 1986. 447 с.
69. Гордов А.Н. «Основы пирометрии». - М.: Metallurgy, 1977. 477 с.
70. Зеленов И.А., Лещенко Е.П. «Лучистый теплообмен элементов конструкции летательных аппаратов». - М.: МАИ, 1990.
71. Никитин П.В. «Определение конвективных тепловых потоков большой интенсивности калориметрическими датчиками разного типа». Методические указания. - М.: МАИ, 1990.
72. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С, Савин В.К. «Теплообмен при взаимодействии струй с преградами». — М.: Машиностроение, 1977. 177 с.
73. Афанасьев В.А., Барсуков В.С., Давыдов Н.Н. «Методы и средства измерений при тепломеханических испытаниях летательных аппаратов». - М.: МАИ, 1977.
74. Бегларьян В.Х. «Механические испытания приборов и аппаратов».- М.: Машиностроение, 1980. 233 с.
75. Бессонов А.Ф. «Установки для высокотемпературных комплексных исследований». — М.: Машиностроение, 1974. 191 с.
76. Грановский В.А. «Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения». — Л.: Энергоатомиздат, 1984. 220 с.
77. Афанасьев В.А., Захаров Ю.В. «Испытания летательных аппаратов на воздействие вибрационных нагрузок». — М.: МАИ, 1985.
78. Левшина Е.С, Новицкий П.В. «Электрические измерения физических величин». - Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
79. Петунин А.Н. «Измерение параметров газового потока». (Приборы для измерения давления, температуры и скорости). - М.: Машиностроение, 1974. 260 с.
80. «Лазерная диагностика потоков». Под ред. В.А. Фабриканта. - М.: Изд-во МЭИ, 1990. 287 с.143

81. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. «Методы лазерной доплеровской анемометрии». — М.: 1982. 303 с.
82. Ринкевичюс Б.С. «Лазерная анемометрия». — М.: Энергия, 1978. 159 с.
83. «Лазерное доплеровское измерение скорости газовых потоков». Сб.№1 / Под общ. ред. Г.Л. Гродзовского. - М.: Изд. ЦАРИ, 1976. 286 с.
84. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А., и др. «Двухфазные моно - и полидисперсные течения газа с частицами». М.: Машиностроение, 1980. 172 с.
85. Лыков А.В. «Теория теплопроводности». -М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
86. Никитин П.В., Степаненко С.А., Низовитин А.А. «Термооптический зонд для измерения температуры гомогенных и гетерогенных потоков». // Современные проблемы науки и образования. - 2007. - № 6
87. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. «Сплавы для термопар». Справочник. — М.: Металлургия, 1983. 360 с.
88. Латышев Х.И., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н. «Излучательные свойства твердых материалов». Справочник. Под общ. ред. А.Б. Шейндлина. — М.: Энергия, 1974. 471 с.
89. Гордов А.Н., Жугалло О.М., Иванова А.Г. «Основы температурных измерений» - М.: Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
90. Абрамович Г.Н. «Прикладная газовая динамика». - М.: издательство «Наука», 1976. 888 с.
91. Лепешинский И.А. «Газодинамика одно- и двухфазных течений в реактивных двигателях». М. Издательство МАИ. 2003.
92. Henderson, C. B., AIAA Journal 14, 707, 1976.
93. Никитин П.В., Чугунков С.А. «Турбулентное смешивание высокотемпературной струи в неограниченном вязком пространстве». Современные проблемы теплообмена в авиационной технике: Тематический сборник научных трудов МАИ. - М.: МАИ, 1983.

94. В.С. Авдеевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебова и др. «Основы теплопередачи в авиационной и ракетно – космической технике. Учебник для авиационных специальностей вузов». Под общ. ред. В. С. Авдеевского, В.К. Кошкина. 2-е изд., переработанное и дополненное – М.: Машиностроение, 1992 с.
95. Шлихтинг Г. «Теория пограничного слоя». М.: Наука, 1974.
96. О.М. Белоцерковский и др. «Обтекание затупленных тел сверхзвуковым потоком газа». – М.: Изд. АН СССР, 1966.
97. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Репин И.В. «Гетерогенные потоки: газодинамика, теплообмен, эрозия». М., 1997. (Препринт ИВТАН, №2 – 402).
98. Алхимов А.П., Клинков СВ., Косырев В.Ф. «Течение в сверхзвуковом сопле большого удлинения с прямоугольным сечением». «Теплофизика и аэромеханика», № 7, с.21...30.
99. Никитин П.В., Пророков С.М., Степаненко С.А. «Особенности газодинамики и теплообмена при сверхзвуковом течении гетерогенной среды в микросоплах с большим удлинением». Доклад. 5-ая международная конференция Авиация и космонавтика- МАИ 2006.
100. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.С. «Моделирование процесса теплоэрозионного воздействия двухфазных сред». МЖГ, изд. АН СССР, 1989, №4, с.92...98.
101. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. «Эрозия поверхностей в гетерогенных потоках». – М.: 1989, - 62с. (Препринт ИВТАН №2-277.
102. Семилетенко Б.Г., Усков В.Н. Экспериментальные зависимости, определяющие положение ударных волн в струе, истекающей на преграду, перпендикулярно ее оси. ИЖФ, т. XXIII, № 3, 1972, с.453...458.
103. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. «Течения газа в соплах» - М. Издательство МГУ, 1978, 351с.
104. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А., Подвысоцкий А.Н. «Двухфазные моно – и полидисперсные течения с частицами». – М. Машиностроение. 1980,172с.

105. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. «Многофазные течения газа с частицами». М.: Машиностроение, 1994, 320с.
106. Лужанский Б.Е., Солнцев В.П. «Экспериментальное исследование теплообмена в зонах отрыва турбулентного пограничного слоя перед уступом» - ПМТФ, 1971, №1, с.126...130.
107. Стернин Л.Е. «Основы газодинамики двухфазных течений в соплах». — М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
108. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А., Подвысоцкий А.Н. «Двухфазные моно – и полидисперсные течения газа с частицами». – М.: Машиностроение, 1980, 172с.
109. Корн Г.А., Корн Т.М. «Справочник по математике для научных работников и инженеров». М.: Наука, 1984, 831с.
110. Волков В.А., Маслов Б.Н., Пирумов У.Г. «Зависимость потерь удельного импульса сопла Лаваля от характера протекания кристаллизации частиц конденсата». /Течение разреженного газа с частицами/. Сборник трудов VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов. М.: МАИ, 1987, с.15...20.
111. Никитин П.В., Кочерин Ю.А., Дикун Ю.В. Взаимодействие двухфазных потоков с преградой. Сб.трудов МАИ: «Исследование теплообмена в ЛА». М.: МАИ, 1982, с. 16.
112. Фролов Ю.П., Никитин П.В., Пайко В.В., Смолин А.Г. Закономерности формирования и свойства газодинамических покрытий. Доклад. 3-ий Минский международный форум по тепло - и массообмену. Минск, 1996.
113. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. и др. Возможности моделирования и стенды для теплоэрозионных исследований. Препринт №2-383, ИВТАН РАН, 1995, 61с
114. Полежаев Ю.В. О механизме взаимодействия атмосферных образований на летательные аппараты. Сборник статей: Исследование высокоскоростных ударных явлений. – М.: ВВНА им. Жуковского Н.Г., 1981, 29...43с.

115. Борисов Ю.С. Современные достижения в области нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Порошковая металлургия, 1993. № 7. с. 5...10.
116. Фролов Ю.П., Браун С.Д. «Свойства газодинамических покрытий». Труды международного симпозиума по трибологии фрикционных материалов, 1991, т.1, с. 2...4.
117. Никитин П.В., Степаненко С.А. «Газодинамика и межфазный теплообмен при натекании сверхзвукового гетерогенного потока на преграду». Жур. «Поиск», 2008, т.15, №5, с. 34-40.
118. Basinski Z.S. and Christain. Australian, J. Phys, 1960, 13, 299.
119. Костиков В.И., Митин Б.С. О движущей силе растекания жидкой фазы по твердой; Сб. Высокотемпературные материалы. М.: Металлургия, 1986. с.
120. Кетбышев О.А., Краюхин В.И., Уманский Я.С., Эпштейн Г.Н. «Технология легких сплавов», 1967. №3, с.9.
121. Альтшуллер Л.Л. «Успехи физических наук». 1965, т. 65, вып.7. 197 с.
122. Красулин Б.Л. «Теоретическая и экспериментальная химия». 1967, вып. 1, т. 3, с. 58
123. Красулин Ю.Л. «Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе». — М.: Наука, 1971. 120 с.
124. Мак-Куин Р., Марш С. «Динамические испытания твердых тел при высоких давлениях». — М.: Мир, 1965. с. 93.
125. Z.F. Trueb. J. Appl. Phys, 1969, v 40, №7, p 2976...2987.
126. Никитин П.В., Степаненко С.А. «Упрощенный алгоритм расчета межфазного теплообмена в условиях градиентного течения гетерогенной смеси». Доклад. 6-ая международная конференция Авиация и космонавтика-МАИ 2007
127. Дремин А.Н., Бреусов О.Н. Природа, 1971, №12, с.10
128. Криштал М.А. «Механизм диффузии в железных сплавах». — М.: Металлургия, 1972. 177 с.

129. Ададуров Г.А., Бавина Т.В., Бреусов О.Н., Дремин А.Н., Клопова Е.Н., Таций В.Ф. «О химических процессах при ударном сжатии». - ВИНТИ, деп. №328 - 68.

130. Никитин П.В., Смолин А.Г., Степаненко С.А. «Тепло-массообмен при формировании разнофункциональных покрытий сверхзвуковым гетерогенным потоком». Доклад. 5-ая международная конференция Авиация и космонавтика- МАИ 2006

131. Криштал М.А. «Механизм диффузии в железных сплавах». — М.: Металлургия, 1972. 177 с.

132. Перельман Р. Г. «Эрозия элементов двигателей энергоустановок». – М.: Машиностроение 1986, 251с.

133. «Справочник по физике». Б.М. Яворский и др. М.: Наука, 1974. с.259.

134. P. Nikitin. «Low Temperature Dynamic Method for Synthesis of the Composite Materials and Multifunctional Coating with the Predicted Thermophysical Characteristics». The Paper of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 94. Denpasar, Bali, Indonesia, December 1994. P. 453.

135. Андреев Н.А., Никитин П.В., Пайко В.В., Смолин А.Г. Низкотемпературный газодинамический метод синтеза новых многофункциональных покрытий с предсказуемыми теплофизическими свойствами. Доклад. Международный Аэрозольный симпозиум IAS - 3. - Москва, 2...5 декабря, 1996, с.5

136. Авдеевский В.С., Крюков В.Н. , Солнцев В.П. «Экспериментальное исследование структуры пограничного слоя и теплообмена на шероховатой поверхности». М., « Машиностроение», 1965, с.55...90.

137. Shapiro, A. H. “ The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow”. The Ronald Press Company, New York, 1953.

138. Лойтянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: «Наука», 1973, 847с.

139. Никитин П.В., Пророков С.М. Особенности газодинамики и теплообмена при сверхзвуковом течении гетерогенной среды в микросоплах с большим удлинением. Доклад. 3-ий Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск, 1996.

140. Никитин П.В., Степаненко С.А. «Метод определения степени черноты термостойких покрытий». Жур. «Вестник МАИ», т.15, №5, 2008, с238-247

141. Степаненко С.А. «Теплофизика и межфазный теплообмен при формировании защитных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом». Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. –М.: МАИ, 2008.

142. Taeyoung Han, Zhibo Zhao, Bryan A. Gillispie at all, USA. “A fundamental study of kinetic spray process”. ITSC 2004. May 10...12. 2004. Osaka, Japan.

143. Никитин П.В., Смолин А.Г. Патент RU № 2222638 «Устройство для нанесения порошкового покрытия». От 20.01.1999.

144. Никитин П.В., Смолин А.Г. Патент RU № 2222639. «Устройство для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий». От 20.01.1999.

145. Никитин П.В., Смолин А.Г. Патент RU № 2222640. «Устройство для нанесения покрытий на внешние поверхности изделий». От 20.01.1999.

146. Никитин П.В., Смолин А.Г. Патент RU № 2193455. «Мобильное устройство для ремонта и восстановления работоспособности деталей и элементов металлоконструкций в полевых условиях». От 20.04.1998.

147. Никитин П.В., Смолин А.Г. Патент RU № 2168300. «Способ обработки порошковыми специями и приправами мясных и рыбных пищевых продуктов». От 24.03.1999.

148. Никитин П.В., Смолин А.Г. Патент RU № 2179809. «Устройство для обработки порошковыми специями приправами мясных и рыбных пищевых продуктов - полуфабрикатов». От 24.03.1999.

149. Степаненко С.А. «Теплофизика и межфазный теплообмен при формировании защитных покрытий низкотемпературным газодинамическим методом». Диссертация на соискание степени к.т.н. Библиотека МАИ, 2008.

150. Гусев А.И. «Наноматериалы, структуры, технологии». М.: Издательство «ФИЗМАТЛИТ», 2007, 415 с.
151. Huang Xiaou, Lu Yufen. “The Current Situation and Future of Thermal Spraying Industry in China”. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
152. S. Uozato, K. Nakato, M. Ushio. “Development of Ferrous Powder thermal Spray Coatings on Cylinder Bore in Diesel Engine”. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
153. B. Gutman-Goodman and J. Shumar, Waltersburg /USA/. “The effect exerted by modulation on disintegration of the particles being sprayed”. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
154. T. Morishita and T. Itsukaichi, Japan. “ HVOF Ceramic Coatings”. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
155. Chng – Jin Li, Guan – Jun Yang, Xin – chun Huang /China/. “Formation of TiO_2 photocatalyst through cold spraying”. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
156. J. Mondoux, B. Jodoin, Ottawa CDN, L. Ajdelsztajn, Davis, USA and all. “Nanostructured Aluminum Coatings produced using Cold Spraying Technology”. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
157. D. Gilmore, R. Lykhuizern, R. Neiser, and all. “Particle Velocity and deposition efficiency in the cold spray process”, Journal of Thermal Spray Technology 8 (1999), issue 4, pp. 576/82.
158. Van Steenkiste, T. Smith, R. Teetse “Aluminum coating via kinetic spray with relatively large powder particles”. Surface Coatings and Technology 154 (2002), pp. 237/52.
159. J. Vicek, H. Huber, H. Voggenreiter and all. “Kinetic Powder Compaction applying the cold spray process: a study on parameters, ITSC Proceedings 2001, pp. 417/22.
160. Li C/- J, Li W/ - Y.: “Deposition characteristics of titanium coating in cold spray, Surface Coatings and Technology 167 (2003), issue 2-3, pp. 278/23.

161. R. Dykhuzen, R. Neiser. "Optimizing the cold spray process". ITSC Proceedings 2003, pp. 318/26.
162. Van Steenkiste, T. Smith, R. Teetse. "Kinetic Spray Coatings". Surface Coatings and Technology 111 (1999), pp. 62/71.
163. B. Jodoin, "Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation". Journal of Thermal Spray Technology 11, (2002), issue 4 pp. 496/507.
164. M. Morks, M. Shoeid (Cairo, Egypt), A. Ibrahim, NY USA. "Comparative Study of Nanostructured and Conventional WC – Co Coatings". International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
165. B. Marple, H. Yawthame and Y. Xie, CAN. "Characterization of nanostructure and conventional cermet coatings by controlled scratch testing: correlation with abrasion and hardness tests. International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
166. Junichi Yasuoka, Katsuyuki Nakade, Akira Ohmori. "The formation Behavior of Thermal Sprayed TiO_2 Coatings Using Agglomerated Nano-Powders". International Thermal Spray Conference & Exposition. Osaka, Japan, May – 2004.
167. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. «Метод холодного газодинамического напыления» - ДАН СССР, 1990, т. 315, № 5, с. 1062...1065. Авторское Свидетельство № 1644585, 1989.