

СЕРГАЧЕВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ
В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ, СОЗДАВАЕМЫХ КОАКСИАЛЬНЫМИ СОПЛАМИ
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ И ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Ковалев Олег Борисович.

Официальные оппоненты:
Даутов Ильдар Галиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Казанский (приволжский) федеральный университет”.

Гуляев Павел Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет».

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук.

Защита состоится «6» апреля 2018 г. В 11³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, <http://itam.nsc.ru/ru/thesis/>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.
Автореферат разослан « ____ » _____ 20 ____ г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.ф.-м.н.

С.А. Гапонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Двухфазные течения широко распространены в природе и технике. Особый интерес вызывает поведение частиц конденсированной фазы в газовой среде при наличии концентрированных источников энергии таких, как лазерное излучение и низкотемпературная плазма. Многообразие протекающих при этом процессов и недостаточная их изученность сдерживают систематическое развитие областей техники, где такие источники играют ключевую роль. Одной из главных проблем при нанесении порошковых материалов с использованием лазерных и плазменных источников энергии является управление темпами нагрева и ускорения частиц в двухфазном потоке. Для совершенствования и оптимизации струйных режимов подачи порошка и получения покрытий с новыми свойствами требуется глубокое понимание процессов и явлений, которые имеют место при воздействии на материалы лазерных и плазменных источников энергии.

Проблемы лазерного взаимодействия с материалами в аддитивных технологиях изложены в монографиях Н.Н. Рыкалина, А.А. Углова, А.Г. Григорьянца, В.Я. Панченко, И.Ю. Смурова, а также В. Стина (W. Steen), Дж. Мазумдера (J. Mazumder), Д. Лепски (D. Lepski) и Ф. Брёкнера (F. Brückner), в которых особое место уделяется решению задачи газоструйной транспортировки добавляемых частиц порошка к месту нанесения в пятно лазера на подложке. Проблемам плазменного напыления порошков для восстановления изношенных поверхностей деталей и механизмов, а также получения покрытий с особыми свойствами посвящены основополагающие работы В.С. Клубникина, В.В. Кудинова, В.И. Калиты, В.А. Клемёнова, Л.Х. Балдаева, П.А. Тополянского, В.И. Кузьмина, А.А. Михальченко, а также П. Фаушайз (P. Fauchais), А. Вардель (Armelle Vardelle), Л. Винсензи (L. Vincenzi), Ф. Азарми (F. Azarmi) и др.

Лабораторное моделирование с применением современных средств диагностики и регистрации двухфазных потоков и процессов, сопутствующих действию концентрированных источников энергии на конденсированную фазу при ее транспортировке и нанесении является особенно актуально при получении покрытий или изготовлении изделий из порошка, что является приоритетной задачей в аддитивных лазерных и плазменных технологиях.

Цель и задачи

Методами оптической диагностики провести исследования поведения частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках, создаваемых коаксиальными соплами, в условиях воздействия лазерного излучения или низкотемпературной плазмы. Для этого необходимо решить следующие задачи.

– Разработать и собрать диагностический комплекс для регистрации параметров частиц в полете. Провести адаптацию регистрирующей системы к условиям воздействия на материалы лазерных и плазменных источников энергии.

– Провести анализ погрешности измерений собранного диагностического комплекса, оценить характерные величины термодинамических и кинематических параметров частиц твердой или жидкой конденсированной фазы (к-фазы), пролетающих через измерительный объем.

– Обеспечить равномерность подачи порошка в световое поле CO₂-лазерного излучения или плазменной струи.

– Провести измерения скорости и температуры частиц в несущем потоке газа, создаваемого коаксиальным соплом, в условиях действия лазерного излучения.

– Провести измерения скорости и температуры частиц в потоке плазменной струи.

Научная новизна работы

Новыми научными результатами диссертационной работы являются:

1. Усовершенствование аппаратной схемы диагностики параметров частиц к-фазы в двухфазных потоках в условиях лазерного и плазменного воздействия, основанной на использовании времяпролетного метода измерения скорости с двухлучевой лазерной подсветкой и метода трехцветовой пирометрии в приближении серого тела. В отличие от известных аналогов диагностических комплексов, которые строились с использованием дихроичных зеркал, предложена монохроматорная схема и разработан прибор с использованием вогнутой дифракционной решетки, который позволяет увеличить количество длин волн для измерения цветовой температуры частиц без увеличения его габаритов и усложнения оптической схемы, что дает возможность повысить точность измерения. Наличие вогнутой дифракционной решетки позволяет отказаться от использования рассеивающей и собирающей линз для построения изображения частицы на приемнике излучения ФЭУ.

2. С помощью разработанного прибора впервые проведены одновременные измерения температуры и скорости частиц порошков (со средними размерами: Mo – 45 мкм, Ni – 100 мкм, Al – 50 мкм, Al₂O₃ – 34 мкм) в несущем газовом потоке под действием постоянного (с мощностью до 2,5 кВт) и импульсного (с частотой 60 кГц и мощностью в импульсе 117 кВт) CO₂-лазерного излучения. Зарегистрированы эффекты лазерного (за счет давления отдачи паров) ускорения частиц, которые зависят от теплофизических свойств материалов и характеристик излучения. Благодаря одновременным измерениям температуры и скорости частиц удалось экспериментально подтвердить ранее предсказанные (в теоретических работах С.И. Анисимова) режимы лазерного испарения материалов: «медленного» (при интенсивности в пучке не превышающей пороговое значение $I \leq I_p$), и «быстрого» (при интенсивности в пучке выше порогового значения $I > I_p$).

3. С помощью разработанного прибора получены количественные оценки эффективности проплавления частиц порошка оксида алюминия (Al₂O₃), вводимых коаксиально в поток воздушной плазмы, создаваемой плазмотроном мощностью 50 кВт, что позволило усовершенствовать геометрию коаксиально-

го сопла и получить высокоплотные корундовые покрытия с пористостью не превышающей 1%.

Научная и практическая значимость

В странах Западной Европы используются свыше нескольких тысяч плазменных и лазерных технологических установок для напыления и быстрого прототипирования деталей. Поскольку физика этих процессов ввиду их сложности изучена пока не достаточно полно, оптимизация параметров каждого типа установки осуществляется в основном эмпирическим способом. В связи с этим возрастает роль лабораторного экспериментального моделирования с диагностикой и визуализацией быстро протекающих процессов.

Разработанная автором приборная схема оптической регистрации двухфазных потоков позволила измерить температуру и скорость частиц в световом поле CO₂-лазера и оценить влияние характеристик непрерывного и импульсного излучения на их транспортировку к лазерному пятну на подложке. Ранее подобные исследования проводились без лазера. Измерения показали, что в световом поле лазера частицы наносимого порошка приобретают дополнительное индуцированное лазером реактивное ускорение. Полученные результаты могут быть использованы для развития новых технологий нанесения порошкообразных материалов и микропрототипирования изделий с разрешением менее 100 мкм.

Проведенные комплексные теоретические и экспериментальные исследования процессов плазменного напыления позволили определить коэффициент проплавления порошка, подаваемого коаксиально в высокотемпературный газоплазменный поток, и получить корундовые покрытия с низкой, до 1%, пористостью.

На основе проведенных исследований разработан специальный узел радиально-кольцевого ввода порошка, с помощью которого модифицирован плазмотрон с межэлектродной вставкой, позволяющий существенно повысить эффективность плазменного напыления. Таким плазмотроном оснащена разработанная в лаборатории №9 установка «Термоплазма 50-01».

Достоверность результатов

Главные результаты были получены с помощью оптического диагностического комплекса, собранного в ходе выполнения работы для регистрации скорости и температуры частиц в газовом потоке. Достоверность регистрации скорости подтверждается измерением двумя независимыми методами: по собственному излучению частиц и по рассеянному лазерному излучению. Также были проведены измерения скорости на модели частицы, которые показали стандартное отклонение от среднего значения 1,2 %. Измерения температуры частиц получены методами двух- и трех-цветовой пирометрии. Проведена теоретическая оценка методической и инструментальной погрешности при измерении методом двухцветовой пирометрии. Полученные значения составили

2,5 % и 12,2 % соответственно. Измерения инструментальной погрешности, проведенные на модельном объекте – частице с известной температурой, показали значения 5,4 %.

На защиту выносятся

Модернизация и приборная реализация оптической схемы диагностики, ориентированной на исследования особенностей транспорта порошкообразных материалов и количественную оценку степени термической обработки частиц в двухфазных потоках в присутствии концентрированных источников энергии: сопутствующего лазерного излучения и низкотемпературной воздушной плазменной струи.

Результаты измерения кинематических и термодинамических параметров частиц порошков из металлов и керамики: молибдена Mo, никеля Ni, алюминия Al, оксида алюминия Al_2O_3 , с размерами от 28 до 150 мкм, транспортируемых в струйном потоке газа, создаваемого коаксиальными соплами в присутствии излучения CO_2 -лазера мощностью 650–3000 Вт с длиной волны излучения 10,6 мкм, действующего в непрерывном и импульсном режимах.

Результаты измерения скорости, температуры и коэффициента проплавления частиц корунда (размеры частиц Al_2O_3 24–40, 40–63, 63–80, 80–100 мкм) в двухфазных потоках, создаваемых коаксиальным соплом при плазменном напылении. Отличием в измерении коэффициента проплавления является учет в статистике частиц, интенсивность излучения которых ниже порога чувствительности ФЭУ благодаря наличию лазерного зондирования измерительного объема. Плазмотрон мощностью от 35 до 60 кВт, КПД 55–64%, расход плазмообразующего газа 1,2 г/с.

Теоретические оценки и основополагающие выводы по результатам всех измерений.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы, её научные положения и выводы опубликованы в журналах “Теплофизика и аэродинамика”, “Russian Physics”, “Известия вузов: физика”, “Доклады Академии наук”, “Известия ТулГУ. Технические науки” и “Физика и химия обработки материалов”. Материалы диссертации помимо всероссийских были представлены на международных конференциях: “8th International conference on Photonic Technologies (LANE 2014)”, Фюрт, Германия; “4th International Congress on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows”, Томск, Россия, 2014; “13th Asian Symposium on Visualisation”, Новосибирск, Россия, 2015.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 160 машинописных страниц, содержит 86 рисунков, 16 таблиц, в работе содержатся ссылки на 100 научных статей.

Личный вклад автора

Автор лично принимал участие во всех этапах работы, как при разработке оптического прибора, так и при подготовке и проведении экспериментов, где отвечал за функционирование оптического диагностического комплекса, сбор данных, обработку и интерпретацию результатов. Самостоятельно разработал систему автоматизированной обработки данных и принимал участие в написании статей и докладов на конференции.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении представлена общая характеристика работы: описана актуальность выбранной темы в приложениях к технологиям плазменного напыления и лазерной наплавки, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость. Перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** представлен аналитический обзор предшествующих работ по исследованию кинематических и теплофизических параметров частиц под действием лазерного излучения и плазменной струи в двухфазных потоках, формируемых коаксиальными соплами. Рассмотрены факторы, влияющие на поведение частиц. Разобраны и проанализированы основные методы измерения скорости и температуры частиц. Приведена предложенная и модифицированная автором схема измерительной диагностики для регистрации кинематических и теплофизических параметров частиц, представлены её метрологические характеристики.

В **п.1.1** проанализированы исследования двухфазных течений в существующих технологиях лазерной наплавки и плазменного напыления. Представлены численные и экспериментальные работы, исследующие как влияние высококонцентрированных источников энергии на скорость и температуру частиц, так и влияние скорости и температуры частиц на качество покрытия создаваемых в технологиях лазерной наплавки и плазменного напыления.

В **п.1.1.1** построена теоретическая модель, посвященная оценке параметров, влияющих на поведение частиц в газодисперсном потоке, проведен анализ валидации результатов и приведены объяснения некоторым противоречивым экспериментальным данным, полученным в предшествующих работах. Изучение существующих теоретических подходов для описания поведения частиц в газовом потоке позволило найти подходящее модельное решение для анализа влияния различных факторов (теплового, динамического) и получить оценки их степени воздействия на частицы. Получены характерные времена нагрева керамических частиц в горячем газе. Рассчитано характерное расстояние, которое пролетает частица, прежде чем нагреется до температуры плавления и расплавится.

В **п.1.1.2** приведен литературный обзор экспериментальных работ по исследованию поведения частиц в условиях лазерной наплавки. В работах представлены результаты измерения скорости и плотности распределения частиц.

Авторами делается предположение, что лазерное излучение не влияет на поведение частиц, а влияет только на их нагрев. Соответственно, эксперименты проводились в упрощенной постановке, без лазерного излучения и без измерения температуры частиц в полете. Численные эксперименты также проводились в предположении, что лазерное излучение не влияет на кинематические параметры частиц.

Однако учет потери массы за счет испарения материала под действие лазерного излучения в уравнении сохранения импульса приводит к изменению поведения частицы в потоке. При мощности лазерного излучения 3000 Вт диаметр частиц уменьшится в 4 раза¹ по сравнению с начальным размером.

Также была построена модель для анализа процессов тепло- и массопереноса частиц, которые движутся полях сил тяжести, газодинамического давления и лазерного реактивного ускорения в процессе лазерной наплавки². По сравнению с характерной постановкой задачи численного моделирования лазерной наплавки введены дополнительные эффекты взаимодействия частиц с лазерным пучком, а именно давление отдачи паров материала частицы при интенсивном испарении лазерным лучом. Описанный механизм приводит к реактивному ускорению частиц. Мощность лазерного излучения составляла 1, 3, 5 кВт. Скорость стальных частиц диаметром 45 мкм достигала значений 80, 220, 280 м/с соответственно. Это показывает, что нагрев частицы выше температуры кипения приводит к значительному ускорению в поле лазерного излучения. В таком случае при мощности излучения лазера 3000 Вт линейный размер частицы уменьшится не на 75%, а на 0,2 %. Учитывая, что с увеличением мощности излучения эффект реактивного ускорения интенсифицируется, поведение частиц будет отличаться от их поведения в отсутствие лазерного луча.

Таким образом, главным недостатком предыдущих экспериментальных исследований поведения частиц в процессе лазерной наплавки является проведение измерений параметров дисперсной фазы в отсутствие лазерного излучения, что не позволяет зарегистрировать эффект лазерно-индуцированного ускорения и температуру частиц.

В п.1.1.3 представлены предшествующие экспериментальные работы по исследованию поведения частиц в условиях плазменного напыления. Рассмотрены результаты исследований влияния на поведение дисперсной фазы узла ввода порошка в плазменную струю, параметров плазменной струи и внешней среды. При исследовании поведения частиц используются наиболее современные технологии диагностики дисперсной фазы, многие из которых, коммерчески доступны – DPV2000/evolutionary, Accuraspray3G. Существенным недостатком представленных диагностических систем является запуск измерения по собственному излучению частиц. Таким образом, уровень запуска зависит от размера и температуры частицы. Если частица недостаточно нагрета или

¹ Liu Chang-Yi, Lin Jehnming. Thermal process of a powder in coaxial laser cladding // J. Optics & Laser Technology, 2002. V. 35. P. 81-86.

² Kovaleva I.O., Kovalev O.B. Simulation of the acceleration mechanism by light-propulsion for the powder particles at laser direct material deposition // Optics & Laser Technology. 2012. V. 44. P. 714 – 725.

маленького диаметра, то она не будет включена в статистику. Учитывая, что интенсивность излучения в оптическом диапазоне имеет более сильную зависимость от температуры, можно утверждать, что в статистике с наибольшей вероятностью не будут участвовать частицы с низкой температурой. Такая система запуска приводит к завышению средней температуры и коэффициента проплавления. Кроме того в предшествующих работах не приводятся параметры плазменной струи, что не позволяет воспроизвести полученные результаты и использовать их при численном моделировании процессов, сопутствующих плазменному напылению.

В п.1.2 представлен обзор методов измерения скорости и температуры частиц как адаптированных для измерения в условиях действия лазерного излучения, так и тех, которые могут быть адаптированы.

П.1.2.1 посвящен описанию и анализу множества существующих методов измерения скорости частиц в гетерогенном потоке. В лазерной наплавке в основном используют системы со светочувствительными элементами на основе CCD-матриц, в том числе скоростные камеры и PIV-системы. Подобные диагностические комплексы имеют узкий динамический диапазон измерения скорости. В случае широких распределений частиц по скоростям среднее значение будет зависеть от настраиваемого динамического диапазона. Приведенные выше методы применялись для изучения поведения порошка в процессе лазерной наплавки в упрощенной постановке эксперимента без лазерного излучения. Для исследования плазменного напыления использовались как локальные, так и ансамблевые методы измерения скорости частиц, которые реализованы в коммерчески доступных системах. Первые реализованы в устройствах со светочувствительными элементами ФЭУ, вторые – на CCD-матрицах.

В п.1.2.2 рассмотрены известные бесконтактные методы измерения температуры. В процессе лазерной наплавки измерения температуры частиц не проводились, а измерялась лишь яркостная температура подложки, ванны расплава, по которой косвенно оценивалась температура частиц. В плазменном напылении применялся метод цветовой пирометрии в приближении серого тела для определения температуры частиц. Как уже указывалось, основным недостатком использованной аппаратуры является зависимость амплитуды запускающего сигнала от температуры и размера частиц. Например, для размеров частиц от 20 до 100 мкм в температурном диапазоне от 1500 до 4000 К амплитуда может изменяться в 10^4 – 10^6 раз³. Соответственно, некоторые частицы не учитываются при измерении средних значений температур и коэффициентов проплавления частиц. Поскольку зависимость амплитуды сигнала от температуры сильнее, чем от размера частиц, полученные среднее значение температуры и коэффициента проплавления частиц завышены относительно реальных значений.

Ансамблевые методы измерения температуры также обладают своими ограничениями и позволяют проводить измерения только средней температуры частиц по ансамблю. Причем осреднение проводится по площади, а не по ча-

³ Михальченко А.А. Диагностика дисперсной компоненты в гетерогенных плазменных струях: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1994.

стицам. Поскольку вклад частицы в излучение ансамбля частиц с высокой температурой будет значительно выше, даже если сама частица меньше размером, чем остальные, из-за экспоненциальной зависимости от температуры, зарегистрированная температура ансамбля будет близка к температуре самой горячей частицы, а не к среднему значению. Таким образом, опять будут получены искаженные значения температуры и коэффициента проплавления частиц.

Описание экспериментального комплекса, выбранного для оптической регистрации скорости и температуры частиц в высокотемпературном двухфазном потоке приведено в п.1.3.

В п. 1.3.1 представлено описание оптической схемы и принципа работы диагностического комплекса. В работе предполагается проводить измерения скорости как горячих, так и холодных частиц. Поэтому была выбрана следующая схема измерения (рис. 1).

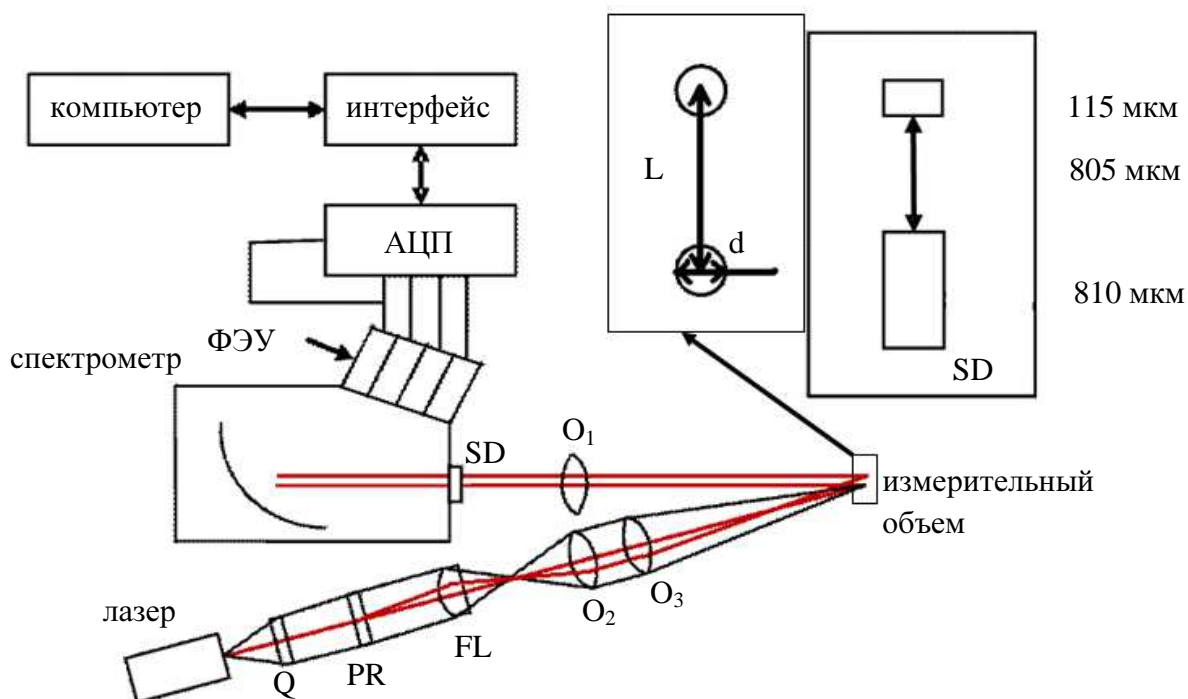


Рис. 1. Оптическая схема диагностического комплекса.

Для измерения скорости и температуры одиночных частиц применялся лазерно-оптический диагностический комплекс, который представляет собой комбинацию лазерного двухфокусного L2F-анемометра и пирометра на базе малогабаритного спектрометра⁴. Такая система совмещает возможности диагностических систем, разработанных для изучения как холодных, так и горячих гетерогенных потоков. Измерения скорости проводились независимыми пассивным и активным методами. В качестве внешнего источника излучения используется одночастотный одномодовый лазерный диод LD, излучающий линейно поляри-

⁴ Nalivaiko V.I., Chubakov P.A., Pokrovsky A.N., Mikhachenko A.A., Kuz'min V.I., Kartaev E.V. Small-Size Spectrometer for Emission Analysis of Low-Temperature Plasma Flows // Thermophysics and Aeromechanics. 2007. Vol. 14, №2. P. 247-256.

зованное излучение с длиной волны $\lambda=532$ нм мощностью до 150 мВт. Для формирования лазерных перетяжек использовалась пара: четвертьволновая пластинка Q и призма Волластона PR. Первая преобразует исходное линейно неполяризованное излучение в излучение с круговой поляризацией, а призма производит угловое разделение по ортогональным линейным поляризациям. Призма PR располагается в задней фокальной плоскости линзы FL, в передней ее плоскости лазерные пучки собираются в два фокальных пятна. Далее эти перетяжки переносятся с помощью коллиматорного объектива O_2 и фокусирующего объектива O_3 в измерительный объем. Расстояние между перетяжками двухфокусного анемометра $L= 500$ мкм, диаметр фокусного пятна $\omega_0=50$ мкм, длина перетяжки постоянного сечения примерно 1 мм; мощность составляла 20 мВт в каждой перетяжке.

Схемная реализация позволяет принимать рассеянное на частице излучение в обратном направлении под углом около 150° к оптической оси спектрометра. В качестве входной щели спектрометра используется двойная щелевая диафрагма SD, расположенная вертикально (см. рис. 1). Изображение 115 мкм отверстия в измерительном объеме совмещено с первой перетяжкой двухфокусного анемометра. Изображение прямоугольной щели 810 мкм совмещено со второй перетяжкой. Диспергирующим элементом спектрометра является голографическая дифракционная решетка, которая выполняет следующие функции: разложение излучения в спектр, фокусировку изображения щели, коррекцию астигматизма и комы и формирование плоского поля фокусировки спектра. Это достигается благодаря переменному шагу и криволинейной форме штрихов решетки. А форма решетки позволяет упростить стандартную схему монохроматора⁵. В плоскости изображения лазерные перетяжки двухфокусного анемометра с помощью призм разведены на отдельные приемники рассеянного лазерного излучения (ФЭУ-60) для того, чтобы идентифицировать попадание частиц в первую и во вторую лазерные перетяжки.

Работа всей системы инициируется сигналами, сформированными аппаратурой двухфокусного анемометра. При попадании частицы в первый фокус (канал 1) фиксируются сигналы (рис. 2, а) для последующего определения температуры частицы. Изображение светящейся частицы, находящейся в том же измерительном объеме, с помощью объектива O_1 проецируется на входную щель спектрометра (см. рис. 1). Для выделения спектральных областей в излучении частиц в плоскости спектра с помощью щелевых диафрагм вырезаются два спектральных диапазона с длинами волн в центре полос пропускания $\lambda_1=616$ нм и $\lambda_2=740$ нм и шириной пропускания ~ 40 нм и ~ 80 нм, соответственно, для определения температуры частицы методом двухцветовой пирометрии. Оптические сигналы поступают в фотоприемные блоки, которые содержат первичные преобразователи ФЭУ-84. Скорость находится после пересечения частицей второго фокуса анемометра. Для исследования различных направлений потока

⁵ Сайдов Г.В., Свердлов О.В. Практическое руководство по молекулярной спектроскопии: Учебн. пос. / Под ред. Н.Г. Бахшиева. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 136 с.

двухщелевую диафрагму можно поворачивать. Метод отличается большой световой эффективностью и высоким пространственным разрешением. С целью уменьшения погрешности измерения температуры частицы была применена трехцветовая пирометрия. С помощью фильтра, пропускающего на длине волны $\lambda_4 = 532$, была введена третья полоса. Ширина пропускания 20 нм. Коэффициент пропускания фильтра известен. В случае с трехцветовой пирометрией сигналы имеют вид, показанный на рис. 2, б. Увеличение цветов приводит к повышению точности измерения температуры, благодаря избыточности информации⁶.

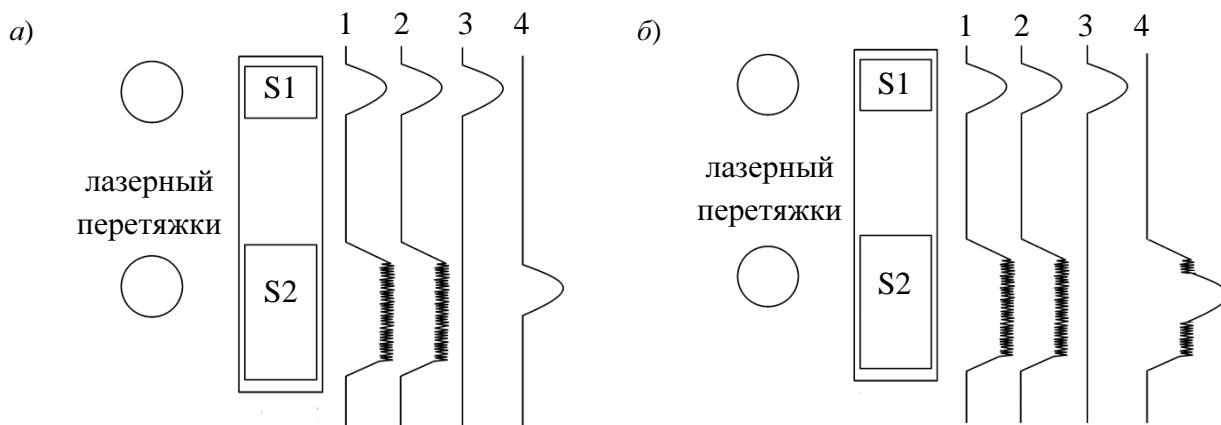


Рис. 2. Схема измерительного объема

Проводимые измерения позволяют сопоставить одиночной частице, пролетевшей через измерительный объем, скорость, измеренную L2F-анемометром, если частица последовательно пересекла две лазерные перетяжки (рис. 2, каналы 3 и 4) и, независимо, скорость, измеренную по сигналу свечения (канал 1 — $\lambda_1 = 0,616$ мкм, канал 2 — $\lambda_2 = 0,7$ мкм), и цветовую температуру, если частица имеет температуру выше порогового значения (около 1500 К для частиц размером порядка 30 мкм). Кроме того, проводимые измерения с применением лазерной подсветки позволяют выделять все частицы, пролетевшие измерительный объем, независимо от их температуры и определять долю прогретых частиц в общем двухфазном потоке. Пересечение частицей двух лазерных перетяжек достоверно свидетельствует о пролете частицей через измерительный объем, а отсутствие сигналов свечения говорит о том, что температура частиц ниже порогового значения.

П.1.3.2 отведен для описания методологии измерения скорости, температуры и размера частиц. Приведены погрешности методов измерения.

Полная погрешность измерения температуры складывается из методической (“несерость” излучения) и инструментальной (погрешность измерения амплитуды сигнала):

$$(\Delta T)_{\text{tot}} = (\Delta T)_{\text{met}} \pm (\Delta T)_{\text{inst}} \quad (1)$$

⁶ Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.:Физматлит, 2012. 248 с.

Одной из трудностей применения спектральных методов измерения температуры одиночных частиц является невысокое отношение сигнал/шум при регистрации монохроматического потока излучения частицы вследствие его малости, что приводит к значительной инструментальной погрешности измерения.

Таблица 1. Методическая погрешность (%) измерения цветовой температуры в зависимости от радиуса и температуры частицы Al_2O_3

Радиус частицы R_p , мкм	Температура частицы T_p , К			
	2330	2440	2550	2950
10	18.8	31.0	8.0	3.6
25	13.4	29.6	2.6	1.2

Формулу инструментальной погрешности измерения цветовой температуры можно получить в приближении белого, если в качестве источника погрешности взять измерение напряжения на ФЭУ

$$\frac{(\Delta T)_i}{T_c} = \frac{2\lambda_1\lambda_2T_c}{(\lambda_2-\lambda_1)c_2} \left(\frac{\Delta U}{U} \right). \quad (2)$$

При регистрации пирометрических сигналов результирующий ток ФЭУ является суммой полезного (постоянного) сигнала I_0 и шумовой составляющей $I_s(t)$, представляющей собой дробовой шум:

$$I(t) = I_0 + I_s(t). \quad (3)$$

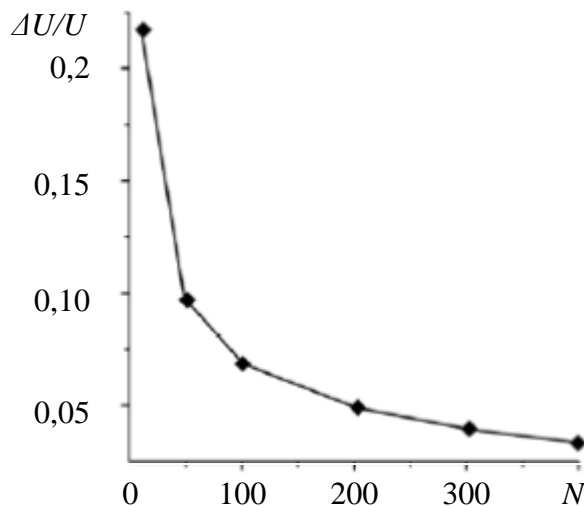


Рис. 3. Относительная погрешность измерения амплитуды сигнала свечения в зависимости от количества точек дискретизации

Рассмотрим относительную величину дробового шума $\Delta I_s/I_0 = (2e\Delta f/I_0)^{1/2}$. Будем считать регистрируемый сигнал, у которого величина аддитивной добавки I_s сравнима с величиной сигнала, т.е. $I_s(t) \sim I_0$. Такой аддитивной добавке случайного шума соответствует относительная величина относительного эффективного дробового шума $\Delta I_s/I_0 = 0,35$ (35%). Тогда $(\Delta U/U) = (1,96/N^{1/2})(\Delta I_s/I_0) = (0,686/N^{1/2})$.

На рис. 3 приведена зависимость погрешности измерения амплитуды сигнала от числа точек дискретизации, по которым проводится усреднение. При $N \sim 200$ погрешность составляет 5–7%.

В одной из предшествующих работ проводился анализ метода полихроматической пирометрии с целью определения возможности более точной оценки средней температуры по ансамблю частиц Al_2O_3 в рамках сделанных допущений о характере излучения одиночной частицы. Для анализа влияния шумов при регистрации пирометрических сигналов на погрешность восстановления температуры частиц было проведено компьютерное моделирование процесса измерения цветовой, трех- и четырехцветовой температуры при различной степени зашумленности сигналов для каждого из приемников. Исходными данными служили размер частиц, их скорость и температура, а также температура плазмы. Результаты показали, что даже в самом простом случае использования трехцветовой пирометрии в приближении “серого” тела получается снижение методической погрешности в 2–3 раза и инструментальной погрешности в 5 раз по сравнению с цветовой температурой.

Описание калибровки оптических трактов и оценка погрешностей измерений представлена в п.1.3.3. В качестве эталонного излучателя для калибровки использовалась лампа СИ 10-300. С целью определения метрологических характеристик и погрешности проведены измерения скорости и температуры эталонной частицы, смоделированной с помощью указанной лампы и вращающегося диска с отверстием размером 130 мкм.

Исследование параметров частиц фазы в процессе лазерной наплавки приведено в главе 2.

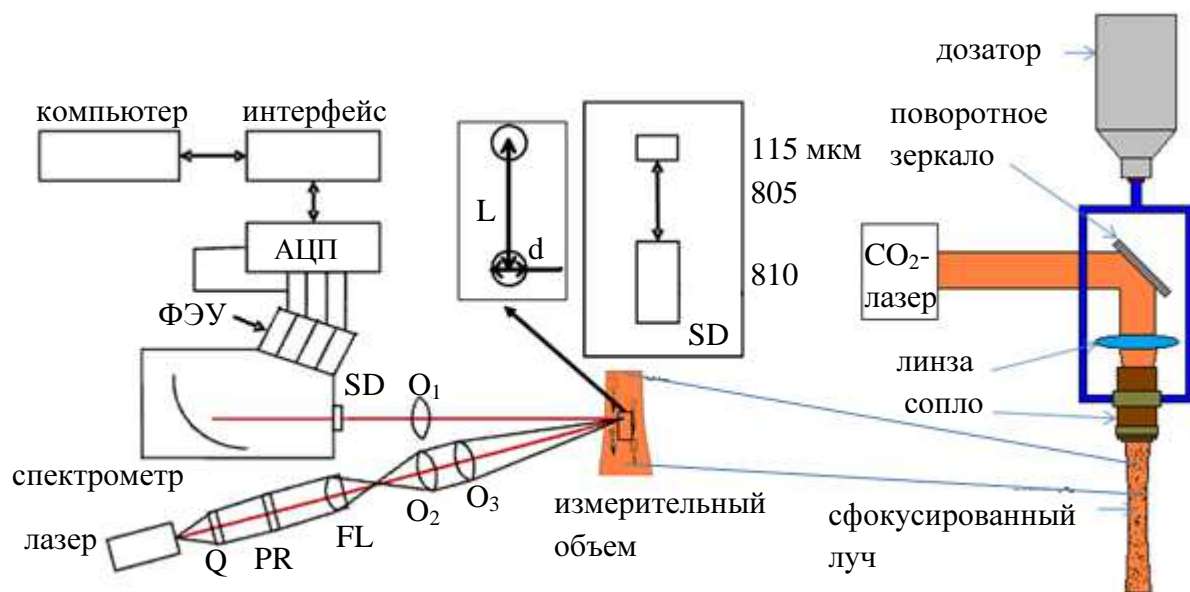


Рис. 4. Схема измерения параметров частиц в полете в процессе лазерной наплавки.

В п.2.1 представлены результаты проведенного тестового эксперимента, выделяющего влияние лазерного излучения на поведение частиц. Параметры лазерного пучка такие же, как при лазерной наплавке. Показано, что лазерное излучение может влиять на скорость частиц.

По результатам анализа взаимодействия лазерного излучения с порошком была выбрана следующая постановка эксперимента (рис. 4) по изучению поведения частиц в процессе лазерной коаксиальной наплавки, которая описана в п. 2.2. В качестве источника излучения использовался CO₂-лазер ЛОК-3СГУ мощностью до 3 кВт, который при необходимости может настраиваться на генерацию излучения как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режиме модуляции добротности резонатора. Импульсный режим позволяет получать высокую плотность излучения в импульсе по сравнению режимом постоянного излучения. Например, при используемой в работе средней мощности $P = 1150$ Вт мощность в импульсе $P_{\text{имп}} = 100$ кВт, плотность излучения $W = 12,7$ ГВт/м² на расстоянии 10 мм от среза сопла при частоте 60 кГц, длительности 200 нс. В обоих режимах работы CO₂-лазера были проведены одновременные измерения скорости и температуры частиц по схеме, представленной на рис. 4. Для подачи порошка в лазерный луч использовалось коаксиальное сопло⁷. Исследовалось поведение частиц Al₂O₃, Ni, Mo, Al.

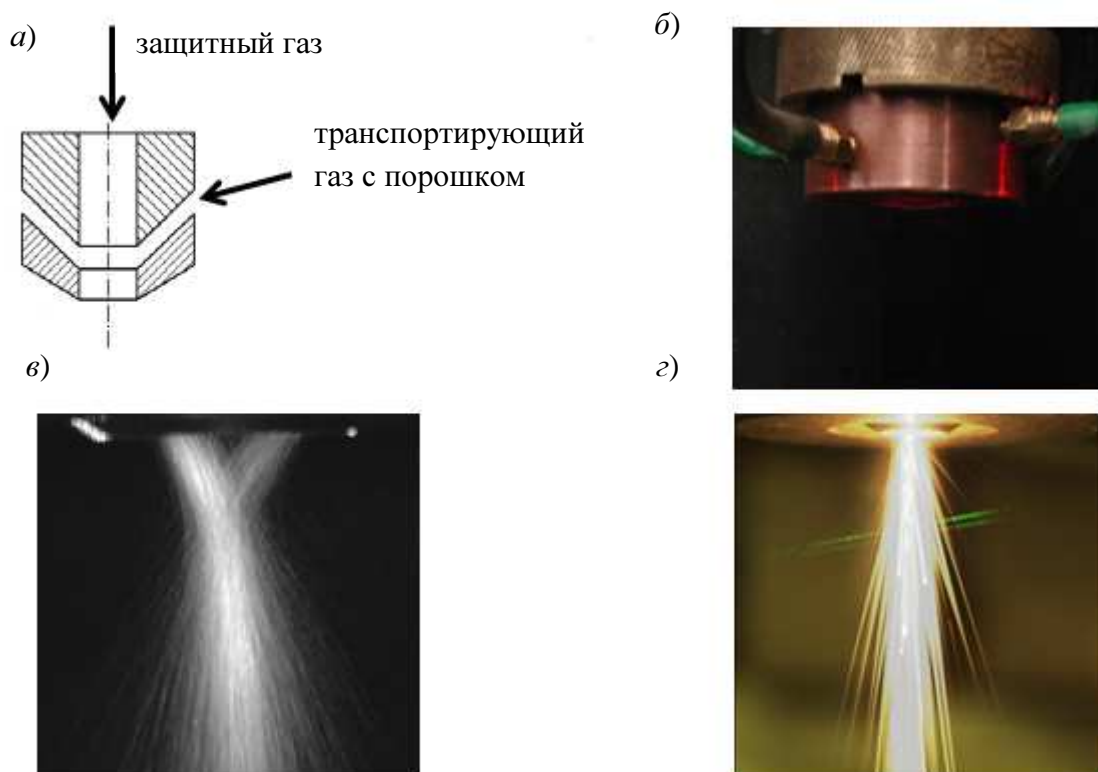


Рис. 5. Подача порошка в поле лазерного излучения через коаксиальное сопло: а – схема подачи порошка, б – внешний вид сопла, в – визуализация потока порошка в отсутствие лазерного излучения, г – визуализация поведения частиц в процессе лазерной наплавки.

В качестве рабочих газов (рис. 5) использовались воздух, аргон, азот. Транспортирующий газ используется для подачи порошка в лазерный луч через сопло. Защитный газ подается для предотвращения загрязнения линзы с фокус-

⁷ Kuzmin V.I., Mikhal'chenko A.A., Kovalev O.B., Kartayev E.V., Rudenskaya N.A. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials // J. of Thermal Spray Technology. 2012. V. 21, No 1. P. 159-168.

ным расстоянием 250 мм. Среднемассовое значение скорости транспортирующего газа варьировалось от 16 до 28 м/с. – скорости газа в области смешения осевого и транспортирующего порядка 5–8 м/с.

С целью исследования влияния лазерного излучения на поведение частиц эксперименты проводились в трех режимах: I – без лазерного излучения; II – постоянного излучения; III – импульсного излучения. Средняя мощность излучения варьировалась от 1100 до 2200 Вт. Теплофизические свойства материала частиц и расходы рабочих газов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Теплофизические свойства материала частиц и расходы используемых рабочих газов

Материал/вещество	Al	Al ₂ O ₃	Ni	Mo	Air	N ₂	Ar
Плотность, ρ , kg/m ³	2700	3970	8900	10220	1.20	1.25	1.78
Температура плавления/кипения, К	933/2792	2323/3253	1720/3000	2850/4885	–	–	–
Средний диаметр частиц d_p , мкм	50	34	100	45	–	–	–
Расход несущего газа G_c , г/с	–	–	–	–	0.15	0.15	0.13
Расход транспортирующего газа G_t , г/с	–	–	–	–	0.33	0.33	0.3
Расход порошка G_p , г/мин.	6.6	1.5 – 4.5	50	35	–	–	–

В п. 2.3 представлены результаты измерений температуры и скорости частиц под действием лазерного излучения, работающего в постоянном режиме. Получены статистические распределения частиц оксида алюминия (рис. 6), никеля, молибдена и алюминия по скоростям на расстоянии $z = 10, 30, 50$ мм от среза сопла.

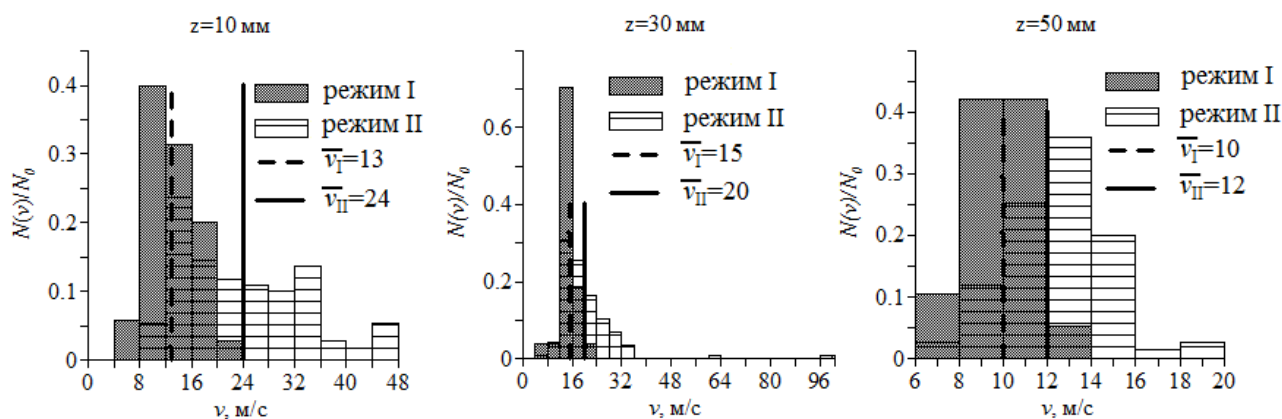


Рис. 6. Статистические распределения частиц Al₂O₃ по скорости.

Расход порошка в эксперименте, результат которого представлен на рис. 6 равнялся 1,5 г/с, концентрация частиц Al₂O₃ в области газодинамического фокуса составила 1,2·ч/мм³. Видно, что с увеличением расстояния уменьшается среднее значение скорости частиц. Лазерное излучение приводит к уширению

распределения частиц по скоростям, появлению второй моды распределения и частиц с экстремально высокой скоростью до 96 м/с. На расстоянии $z=10$ мм наблюдается максимальное изменение распределения частиц по скоростям по сравнению с распределением, полученным в режиме I без лазерного излучения. Мощность излучения лазера в постоянном режиме составила 1700 Вт, интенсивность в точке $z=10$ мм порядка 225 МВт/м^2 . Поскольку фокус линзы заглублен в сопло, то с дальнейшим увеличением расстояния плотность излучения будет падать, соответственно будет уменьшаться среднее значение скорости (рис. 7).

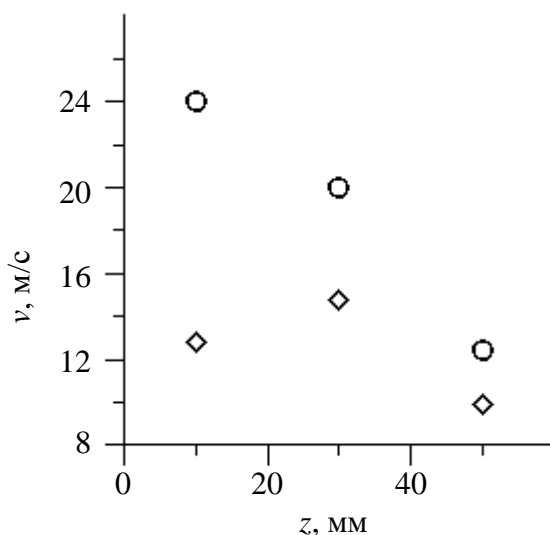


Рис. 7. Распределение средних значений скоростей частиц оксида алюминия в процессе лазерной наплавки.

◇ – в отсутствие лазерного излучения, ○ – в режиме постоянного излучения ($P = 1700$ Вт).

Проведенные измерения температуры показали, что частицы оксида алюминия интенсивно нагреваются под действием постоянного лазерного излучения (рис. 8). Если времени релаксации скорости достаточно для её выравнивания со значениями, полученными в режиме I, то продолжительность релаксации температуры частиц больше, чем время ускорения частиц, и они не успевают остыть. В ячейку с температурой частиц от 1400 до 1600 К были помещены частицы, излучения которых было не достаточно для регистрации их температуры. Однако их скорость была измерена лазерным двухфокусным зондом. Эти частицы участвовали в статистике при получении распределения по скоростям. Наличие частиц с температурой выше температуры кипения оксида алюминия свидетельствует о наличии интенсивного испарения материала частицы с её поверхности, что приводит к значительному увеличению погрешности и завышению значения температуры.

Так же в параграфе представлены результаты проведенных измерений скорости и температуры частиц для остальных материалов Ni, Mo, Al, которые показали, что влияние постоянного излучения на поведения частиц зависит от материала. Температуру удалось померить только для частиц оксида алюминия и никеля, излучения частиц алюминия и молибдена было недостаточно для регистрации их температуры.

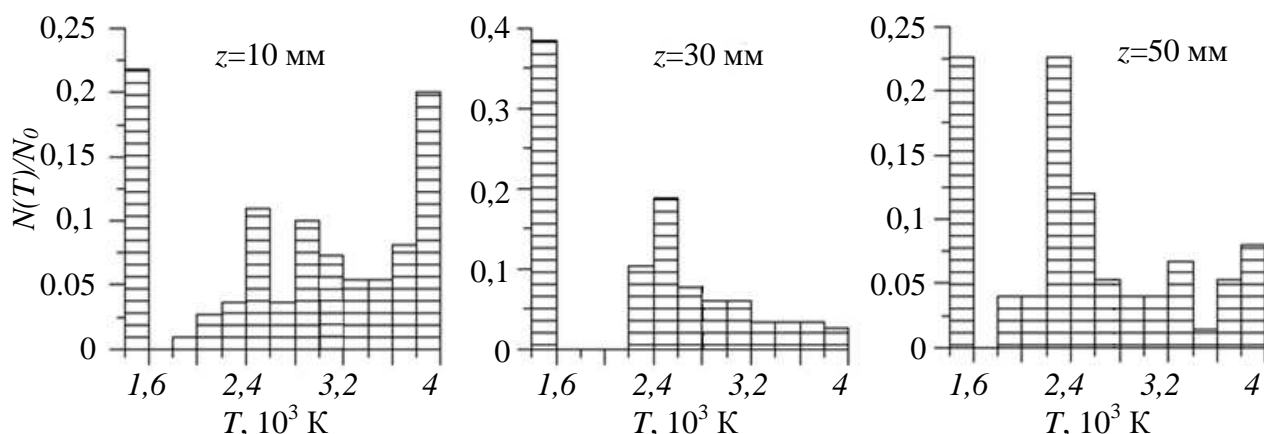


Рис. 8. Статистические распределения частиц Al_2O_3 по температуре.

В п.2.4 представлены результаты измерения температуры и скорости частиц Al_2O_3 , Ni, Mo, Al под действием импульсного лазерного излучения (режим III). Результаты также были представлены в виде статистических распределений от скорости и температуры. Измерения проводились только на расстоянии $z=10$ мм от среза сопла. Максимальные значения скоростей отдельных частиц были зарегистрированы для порошка алюминия (рис. 9)

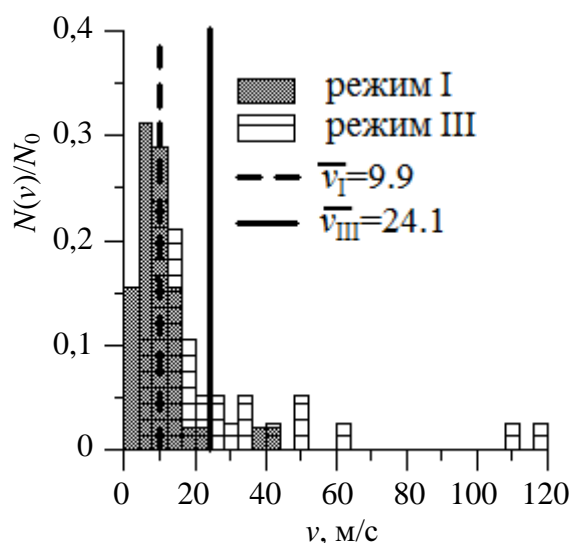


Рис. 9. Сравнение статистического распределения частиц Al по скоростям в режиме I в отсутствие лазерного излучения с распределениями, полученными в режиме импульсного излучения, $z=10$ мм, рабочий газ азот.

Температуру удалось измерить только для частиц оксида алюминия, так как излучения частиц Ni, Mo, Al было ниже уровня чувствительности оптической диагностики.

Результаты измерения скорости частиц в двухфазном потоке в поле лазерного излучения были сведены в таблицу 3

Таблица 3. Средние значения скоростей одиночных частиц в полете на расстояние 10 мм от среза сопла (плотность излучения на расстоянии 10 мм от среза сопла).

Материал порошка	Al ₂ O ₃	Mo	Ni		Al	
	воздух	N ₂	N ₂	Ar	N ₂	Ar
v_{tr}^* , м/с	26	27	27	17	27	17
Режим I, м/с	13	6,7	5,1	2,4	9,9	–
Режим II, м/с (ГВт/м ²)	24 (0,18)	14,9 (0,28)	6,8 (0,27)	8,3 (0,21) 7,8 (0,19)	13,5 (0,23)	–
Режим III, м/с (ГВт/м ²)	26 (10) 23 (26)	10,7 (15,5)	14,8 (15)	–	24,1 (16,6)	27,6 (16,6)

В п.2.5 проведено сравнение численной модели, в которой использовалась геометрия сопла из эксперимента (см. рис. 5), с полученными результатами. При значениях расхода газа, использованных в экспериментах, максимальная скорость газа достигается в транспортирующем канале 38 м/с. В центральном сопле скорость не превышает 2,5 м/с.

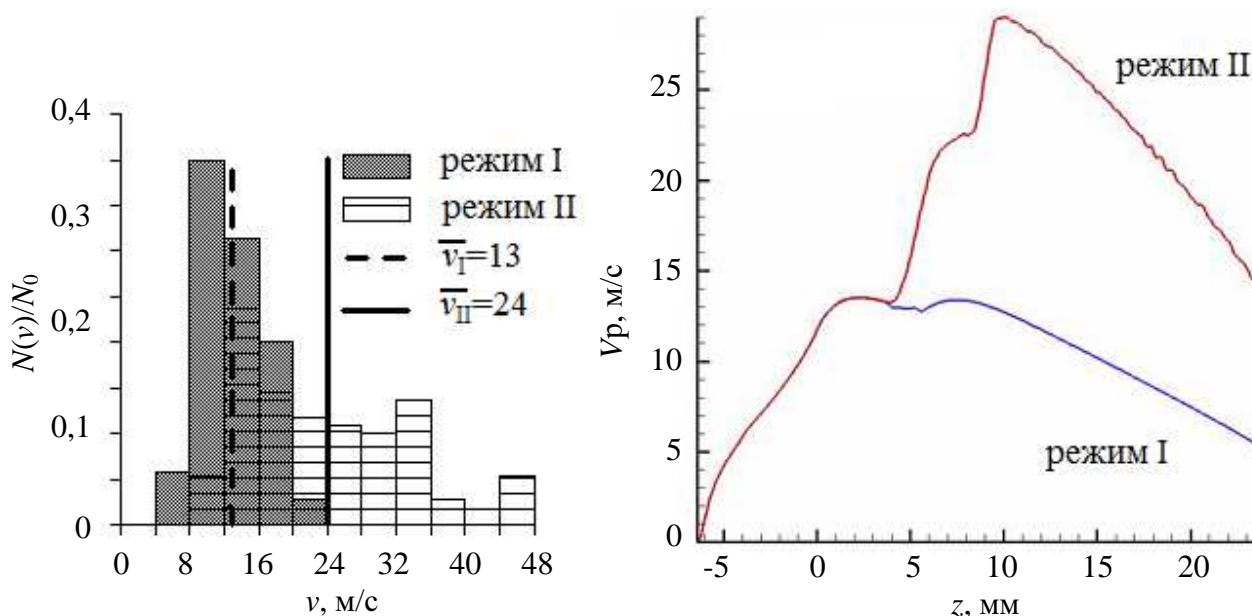


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных (слева) с расчетом (справа): гистограмма распределения частиц по скорости и изменения среднего значения модуля скорости частиц в зависимости от расстояния до среза сопла соответственно.

Порошок оксида алюминия, как и в эксперименте, вводился через кольцевой транспортирующий канал на расстоянии $z = -6$ мм по оси симметрии. Размер частиц был равен 40 мкм. Рассчитывались траектории 400 частиц. Коэффициент не упругости столкновений 0,9. Результат сравнения численной модели с экспериментом представлен на рис. 10.

Сравнение показало удовлетворительное совпадение средних значений скорости с экспериментов, разница составила 2 м/с. Однако в эксперименте не было обнаружено частиц со скоростями, превышающими значение 50 м/с, в то время как в расчете некоторые частицы ускорялись до 100 м/с. Данное различие

в распределении частиц можно объяснить коллективными взаимодействиями, которые не были учтены в математической модели.

В главе 3 представлено экспериментальное исследование параметров дисперсной фазы в двухфазном потоке, где в качестве несущей фазы выступает плазменная струя.

В п.3.1 описывается постановка экспериментов для исследования поведения дисперсной фазы в запыленной плазменной струе. Для генерации плазменной струи в работе использовался плазмотрон “ТНК-50” напылительной установки “Термоплазма 50-01”. Плазмотрон оснащен узлом коаксиальным радиально-кольцевой подачи порошка в плазменную струю. Целью экспериментов является повышение эффективности термической обработки порошка. Решение поставленной задачи, с одной стороны, повысит производительность напыления, с другой позволит создавать покрытия с низкой пористостью, что в свою очередь приведет к увеличению его стойкости к эрозии. Рассматривались три режима с разными расходами плазмообразующего газа 1,0, 1,2, 1,5 г/с с использованием цилиндрического сопла и диффузора на выходе из канала дуги. В качестве плазмообразующего газа использовался воздух. Приведены энергетические и кинематические параметры каждого из режимов. В работе использовались порошки оксида алюминия 4 фракций: 28–40, 40–63, 63–80, 80–100 мкм. Результаты измерения теплофизических параметров плазменной струи при различных расходах плазмообразующего газа представлены в таблице 4. Данные получены путем калориметрирования. В таблице представлена среднемассовая температура, которая определялась по удельной энтальпии потока.

Путем анализа энергетических и кинематических параметров, который был проведен в п.3.2, выбраны оптимальные для термообработки частиц режимы. При дальнейшем выборе подходящих режимов учитывалась не только энергетическая составляющая задачи теплообмена нагретого газа с порошком, но и уменьшение теплового потока, воздействующего на подложку. Таким образом, была проведена термическая обработка порошка оксида алюминия фракцией 28-40 мкм с использованием цилиндрического сопла при расходах плазмообразующего газа 1,2 и 1,5 г/с. Фракция 40–63 обработана как с цилиндрическим соплом, так и с диффузором при расходах 1,2 и 1,5 г/с. 63–80 – с диффузором при расходе плазмообразующего газа 1,5 и 1,2 г/с, с цилиндрическим соплом при расходе газа 1,5 г/с. Обработка частиц фракции 80–100 мкм проведена только с диффузором в режимах с расходом плазмообразующего газа 1,2 и 1,5 г/с. Показано, что в указанных режимах максимальный размер частиц, для которых получается достичь близкой к 100% степени обработки, – 63–80 мкм.

В п.3.3 с помощью разработанной и собранной диагностической системы проведено исследование поведения частиц. С учетом результатов анализа термообработки частиц получены статистические распределения частиц по скоростям и температуре для частиц размером. В приближении теории Ми были получены распределения частиц по размеру.

Основываясь на теплофизических и кинематических характеристиках режимов напыления (см. табл. 4) и результатах термической обработки, были вы-

браны режимы для измерения параметров частиц. Максимальный размер частиц, которые удалось обработать, 63–80 мкм. Удовлетворительную обработку удалось получить в режиме с расходом плазмообразующего газа 1 и 1,2 г/с. В качестве сопла использовался диффузор. На рис. 11 представлены осевые распределения средних значений скоростей и коэффициентов проплавления частиц. Видно, что изменение расхода газа не приводит к изменению распределения средних значений скоростей. Распределение коэффициентов проплавления показали зависимость длины области с высоким коэффициентом проплавления более 90 % от расхода плазмообразующего газа. При расходе газа 1 г/с коэффициент проплавления частиц оксида алюминия размером 40–63 мкм превышает 90 % на расстоянии 100 мм, затем начинает падать. При расходе плазмообразующего газа 1,2 г/с понижения коэффициента проплавления ниже 90% наблюдается на расстоянии 200 мм. Таким образом, оптимальными для получения покрытий с низкой пористостью расстояниями напыления в режимах с расходами плазмообразующего газа 1 и 1,2 г/с будут 100 и 200 мм соответственно. Уменьшение дистанции будет приводить к неоправданному увеличению термической нагрузки на подложку.

Таблица 4. Рабочие режимы плазмотрона

$G_{\text{рб}}$, г/с	I, А	U, В	P, кВт	КПД, %	H, Мдж/кг	T, К	V, м/с
1,0	160	217	34,7	58,5	20,3	5400	420
1,0	180	212	38,2	57,8	22,0	5600	450
1,0	200	210	42,0	57,0	23,9	5700	460
1,0	220	210	46,2	56,7	26,2	6000	500
1,0	240	208	49,9	55,3	27,6	6100	520
1,2	160	233	37,3	61,4	18,3	5100	500
1,2	180	232	41,8	61,1	20,4	5400	530
1,2	200	230	46,0	61,0	22,4	5600	560
1,2	220	228	50,2	59,4	23,8	5700	580
1,2	240	225	54,0	59,5	25,7	5900	610
1,5	160	251	40,2	63,5	17,0	4800	550
1,5	180	250	45,0	63,7	19,1	5200	610
1,5	200	248	49,6	63,6	21,0	5400	640
1,5	220	243	53,5	62,3	22,2	5600	680
1,5	240	242	58,1	62,8	24,3	5800	710

В ходе экспериментов также были получены распределения средних значений скоростей и коэффициента проплавления частиц оксида алюминия размером 28–40 мкм (рис. 11). Расход плазмообразующего газа составил 1,2 г/с. На выходе за узлом подачи порошка стояло цилиндрическое сопло. Среднее значение скорости частиц достигло 410 м/с на центральной оси симметрии при $z = 100$ мм.

Установлено, что частицы фракции 28–40 мкм имеют высокий коэффициент проплавления до 150 мм на расстоянии от среза сопла, после чего начинается резкое его падение. В этом случае оптимальной дистанцией следует выбрать именно 150 мм, так как при приближении к срезу сопла увеличиваются тепловые потоки в подложку. Распределение средних значений скоростей частиц

Al_2O_3 размером 63–80 мкм на центральной оси симметрии в зависимости от расстояния до среза сопла получены с диффузором при расходах плазмообразующего газа 1,0 и 1,2 г/с. В первом случае оптимальным расстоянием напыления будет 100 мм, во втором – 200 мм.

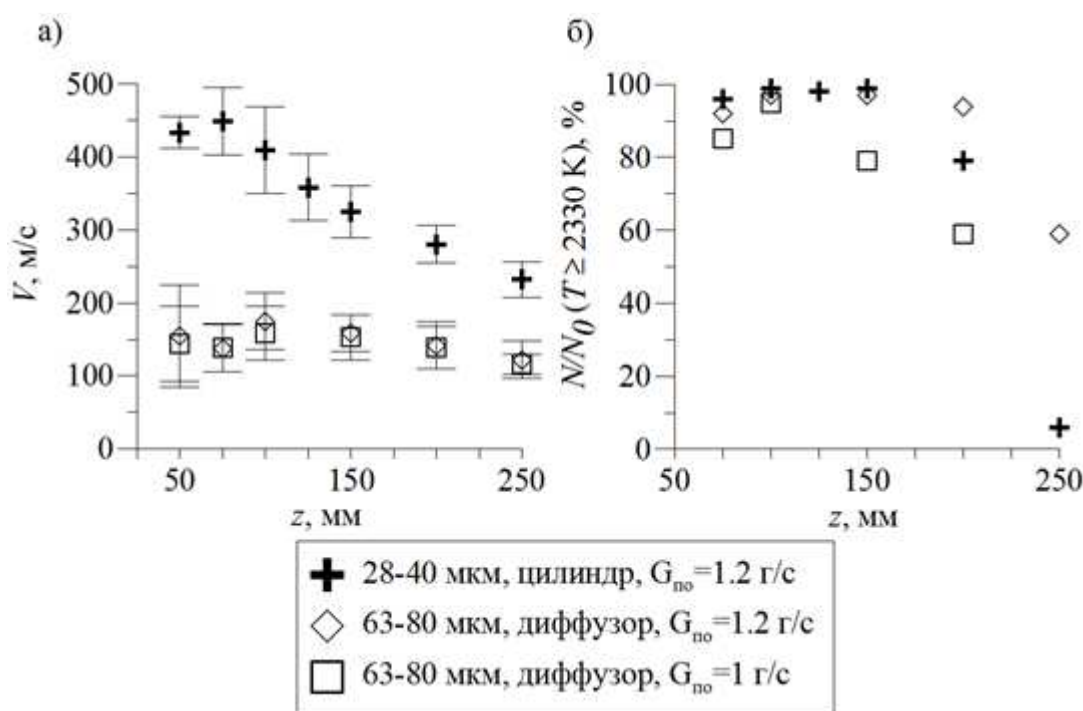


Рис. 11. Осевые распределения средних значений скоростей (а) и коэффициент проплавления частиц (б).

В п.3.4 для режима напыления частиц оксида алюминия 28–40 мкм с использованием цилиндрического сопла проведена оценка эффективности термообработки частиц на оптимальной дистанции напыления 150 мм. В этом сечении были проведены измерения распределения коэффициентов проплавления в радиальном направлении. Оценка эффективности проплавления по фотографиям обработанных частиц показала значение 92 %. Среднее значение коэффициента проплавления в сечении, полученное в результате оптических измерений температуры частиц, составило 90%. Значение получено в предположении нормального распределения концентрации частиц и круглой формы сечения струи порошка.

Заключение

Основные результаты диссертации состоят в следующем.

1. Усовершенствована аппаратная схема диагностики параметров конденсированной фазы в двухфазных потоках в условиях лазерного и плазменного воздействия, которая основана на использовании времяпролетного метода измерения скорости с двухлучевой лазерной подсветкой и метода трехцветовой пирометрии в приближении серого тела. В отличие от известных аналогов диагностических комплексов, которые строились с использованием дихроичных

зеркал, предложена монохроматорная схема и разработан прибор с использованием вогнутой дифракционной решетки, который позволяет увеличить количество длин волн для измерения цветовой температуры частиц без увеличения его габаритов и усложнения оптической схемы, что дает возможность повысить точность измерения. Наличие вогнутой дифракционной решетки позволяет отказаться от использования рассеивающей и собирающей линз для построения изображения частицы на приемнике излучения ФЭУ.

2. С помощью разработанного прибора впервые проведены одновременные измерения температуры и скорости частиц порошков (со средними размерами: Mo – 45 мкм, Ni – 100 мкм, Al – 50 мкм, Al₂O₃ – 34 мкм) в несущем газовом потоке под действием постоянного (с мощностью до 2,5 кВт) и импульсного (с частотой 60 кГц и мощностью в импульсе 117 кВт) СО₂-лазерного излучения. Зарегистрированы эффекты лазерного (за счет давления отдачи паров) ускорения частиц, которые зависят от теплофизических свойств материалов и характеристик излучения. Удалось экспериментально подтвердить ранее предсказанные (в теоретических работах С.И. Анисимова) режимы лазерного испарения материалов: «медленного» (при интенсивности в пучке меньше порогового значения $I < I_p$) и «быстрого» (при интенсивности в пучке выше порогового значения $I > I_p$), которые положены в основу модели ускорения частиц в световом поле лазера.

3. С помощью разработанного прибора получены количественные оценки эффективности проплавления частиц порошка оксида алюминия (Al₂O₃), вводимого коаксиально в поток воздушной плазмы, создаваемой плазмотроном мощностью 50 кВт, что позволило усовершенствовать геометрию коаксиального сопла и впервые получить высокоплотные корундовые покрытия с пористостью не превышающей 1%.

4. Показано, что получаемый в плазменной струе коэффициент проплавления порошка зависит от силы тока, расхода плазмообразующего газа, размера частиц и геометрии сопла, варьированием которых удастся подобрать оптимальные значения температуры газа и времени нахождения частиц в высокотемпературном ядре плазменной струи.

5. На основе проведенных исследований разработан плазмотрон для напыления керамики с равномерно распределенным коаксиальным вводом порошка в плазменную струю, которым укомплектована опытно-промышленная напылительная установка “Термоплазма 50-01” производства ИТПМ СО РАН.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Михальченко А.А., Кузьмин В.И., Сергачев Д.В., Картаев Е.В., Иванчик С.Н., Иванчик И.С. Исследования динамики нагрева и ускорения частиц Al₂O₃ в осесимметричном гетерогенном потоке плазмотрона с межэлектродными вставками (МЭВ) // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, №4. С. 537-549.

2. Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Сергачев Д.В., Картаев Е.В. Экспериментальное исследование нагрева и ускорения частиц Al_2O_3 в потоке термической плазмы при распределенном вводе порошка // Изв. вузов. Физика. 2014. № 3/3. С. 203-206.
3. Сергачев Д.В., Кузьмин В.И., Картаев Е.В., Наливайко В.И. Лазерно-оптическая диагностика частиц в технологиях плазменного напыления и лазерной наплавки // Известия вузов. Физика. 2014. №10/3 (57). С. 254-258.
4. Швейкин Г.П., Руденская Н.А., Соколова Н.В., Кузьмин В.И., Картаев Е.В., Сергачева Д.В. Сверхзвуковая плазма и износостойкие покрытия из никелевых сплавов // ДАН: химическая технология. 2015. том 463. № 3. С. 309-312.
5. Сергачев Д.В., Картаев Е.В., Ковалев О.Б., Кузьмин В.И. Применение лазерно-оптической диагностики для исследования аддитивных технологий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 6. Ч. 2. С. 252-262.

Материалы конференций

6. Sergachev D.V., Mikhail'chenko A.A., Kovalev O.B., Kuz'min V.I., Grachev G.N., Pinaev P.A. Laser-optic measurement of velocity of particles in the powder stream at coaxial laser cladding // Physics Procedia. 2014. Vol. 56, P. 193-203.
7. Kovaleva. I, Kovalev O., Zaitsev A.V., Sergachev D.V. Modeling an numerical study of light-propulsion phenomena of particle acceleration in coaxial laser power cladding // Physics Procedia. 2014. Vol. 56. P. 439-449.
8. Michalchenko A.A., Nalivaiko V.I., Kartaev E.V., Kuzmin V.I., Sergachev D.V., Pinaev P.A. Laser-Optical Diagnostic of Dispersed Phase Parameters Applied to Additive Technology of Surface Modification by High-Dense Energy Source // 4th In. Congr. High Current Electronics, Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, and Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, Tomsk, Russia, September 21-26, 2014. Tomsk. Publishing House of IAO SB RAS. 2014. Abstracts. P. 361.
9. Sergachev D.V. Application of laser-optical diagnostics to research additive technologies // 13th Asian Symposium on Visualization, June 22-26, 2015. Novosibirsk. 2015. Abstracts. P. 200-202.

Ответственный за выпуск Д.В. Сергачев

Подписано в печать 22.01.2018
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.4
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 3

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1