

УДК 533.6

Влияние импульсного излучения CO₂-лазера на транспортировку порошка при лазерной наплавке металлов*

Д.В. Сергачёв¹, О.Б. Ковалев¹, Г.Н. Грачёв², А.Л. Смирнов², П.А. Пинаев²

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

E-mail: yosergach@gmail.com

Решаются проблемы измерения скорости и температуры частиц в световом поле импульсно-периодического лазера с использованием бесконтактных методов регистрации на основе спектрометра и комплекса лазерных и оптических средств. Методика диагностики объединяет два независимых способа измерения скорости частиц: пассивный, основанный на собственном излучении нагретых частиц в газовом потоке, и активный, использующий излучение рассеянного лазерного луча. Приведены гистограммы статистических распределений скоростей частиц для двух режимов работы коаксиального сопла: при отсутствии и наличии импульсного лазерного излучения. В экспериментах применялись различные типы порошков (Al₂O₃, Mo, Ni, Al) со стандартными для технологии лазерной наплавки распределениями частиц по размерам, рабочие газы (воздух, азот, аргон) и CO₂-лазер, работающий в импульсно-периодическом режиме, средней мощностью до 2 кВт и импульсной мощностью десятки/сотни киловатт. Показано, что в поле лазерного излучения частицы порошка приобретают дополнительное ускорение за счет испарения и появления реактивной силы, обусловленной давлением отдачи паров с облученной части поверхности частицы. Показано, что лазерное излучение может значительно влиять на скорость и температуру частиц порошка при его транспортировке газоструйным потоком. Скорости отдельных частиц за счет лазерного ускорения могут достигать значений порядка 120 м/с при максимальной скорости несущего газа до 30 м/с.

Ключевые слова: двухфазный поток, импульсное лазерное излучение, испарение, давление отдачи паров, реактивное ускорение, оптическая диагностика.

Введение

Метод прямого лазерного нанесения материалов (Laser Direct Material Deposition) позволяет производить покрытия и изготавливать детали с прогнозируемыми свойствами путем послойного их наращивания из специально приготовленного для этих целей порошка [1]. Порошок транспортируется на подложку несущим потоком газа с помощью коаксиального сопла, через ось которого проходит лазерный луч. Параметры газового потока должны быть оптимизированы для того, чтобы обеспечить разогрев частиц в световом поле луча и сфокусировать поток частиц в лазерное пятно на подложке. Типичный

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта № 0323-2018-0030, включенного в Комплексную программу фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг.

размер частиц составляет 10–80 мкм, мощность излучения — до 3 кВт, диаметр лазерного пятна — 0,2–4,0 мм. Доставка присадочного материала в виде порошка является ключевым фактором, влияющим на процесс лазерной наплавки, его отработка важна для получения качественного покрытия. Очевидно, что проблема измерения параметров частиц при их транспортировке на подложку в условиях воздействия лазерного излучения является актуальной.

Существующие бесконтактные оптические методы измерения параметров одиночных частиц (скорость, температура, размер) в высокотемпературных потоках можно разбить на две группы: локальные времяпролетные методики на основе собственного теплового излучения частиц, описанные, например, в работе [2], и методики, использующие внешний источник оптического излучения, совмещающие в едином измерительном объеме методы лазерно-доплеровской анемометрии (LDA) с использованием времяпролетного лазерного двухфокусного анемометра (L2F-анемометр), либо методы лазерной фазово-доплеровской анемометрии (LFDA) и пирометрии, как, например, в работе [3].

Преимущество диагностических комплексов, в которых для измерения параметров частиц достаточно их собственного теплового излучения, заключается в простоте и надежности, поскольку в них используется единственный оптический тракт для одновременного измерения всех параметров. Преимущество диагностических комплексов с применением лазеров заключается в возможности расширения диапазона измеряемых параметров в сторону меньших температур и размеров частиц, а также определения доли «холодных» частиц в общем газодисперсном потоке.

В работе [4] в дополнение к анализу свойств готового покрытия было предложено использовать ССD-приемники для исследования процессов, сопутствующих лазерным аддитивным технологиям, что дало преимущество при организации мониторинга качества покрытия в течение всего цикла производства. С тех пор ССD-приемники широко применяются, например, для исследования плотности распределения частиц в потоке [5–12].

В работе [11] была апробирована скоростная киносъемка для измерения скорости частиц в запыленном ядре струи времяпролетным способом с использованием шпирен-регистрации. Существуют и другие способы измерения скорости, такие как метод преобразования Фурье и трехцветовой метод. В работах [5–7, 11] также были измерены скорости частиц по их трекам при лазерной наплавке.

Применение метода PIV [8] для измерения скорости при лазерной наплавке решило сразу две проблемы: позволило получить качественную характеристику двухфазного потока [12] и провести измерение поля скоростей дисперсной фазы. В работе [12] с помощью цифровой голографической объемной реконструкции было измерено поле трех компонент скорости. Необходимо отметить, что регистрация скорости частиц в работах [5–8, 11, 12] осуществлялась в отсутствие лазерного излучения, поэтому измеренные значения скоростей не превышали скорости газа, влияние лазера при этом не исследовалось.

В публикации [11] подчеркивалось, что не только скорость, но и температура частиц сильно влияет на качество покрытия. Однако измерение температуры частиц, попадающих в световое поле лазера и нагреваемых до температур плавления и кипения во время транспортировки к подложке, является сложной задачей. Также в работе [13] было показано, что учет эффекта лазерно-индуцированного реактивного механизма ускорения частиц [14, 15] может приводить к значительному увеличению их скорости и уменьшению потери массы частиц за счет испарения материала с их поверхности.

Авторы работы [16], используя методы оптической диагностики [17–19], провели измерения скорости и температуры частиц в струйном потоке порошка в условиях действия непрерывного CO₂-лазерного излучения. Для порошков Al₂O₃, Mo, Ni, Al и непрерывного излучения CO₂-лазера мощностью до 3 кВт было показано, что регистрируемые эффекты ускорения и нагрева частиц зависят от расхода порошка в потоке. Действие

непрерывного лазерного излучения приводит к разогреву значительного количества порошка до температуры кипения, при этом увеличение средней скорости частиц наблюдалось для каждого исследуемого материала порошка.

Настоящая работа является продолжением ранее начатых исследований [16], где были проведены эксперименты с постоянным лазерным излучением, получены результаты измерений скорости и температуры частиц при воздействии импульсно-периодического CO_2 -лазерного излучения в двухфазной спутной струе, истекающей из коаксиального сопла.

1. Описание лазерной установки и оптической схемы диагностики

1.1. Лазерная установка и схема измерений

Для нагрева частиц порошка использовалась CO_2 -лазерная система генератор-усилитель (СГУ) средней мощностью до 2 кВт и импульсной мощностью десятки/сотни киловатт с возможностью управления частотой следования (до 120 кГц) и длительностью лазерных импульсов [20]. СГУ формирует луч с близким к гауссовскому распределением интенсивности и околодифракционным качеством, а также позволяет снизить эффекты самовозбуждения системы «лазер–металл вблизи фокуса», которые приводят к искажению формы импульса (снижению импульсной мощности). Импульсно-периодическое (ИП) излучение частотой 15 и 60 кГц фокусируется ZnSe-линзой с требуемой интенсивностью на оси коаксиального сопла (рис. 1, здесь G_{tr} и G_{sh} — расход транспортирующего и защитного газов соответственно) [21]. Диагностика скорости и температуры частиц порошка осуществляется в расходящемся лазерном луче на расстоянии 10 мм от среза сопла и при свободном истечении порошка (без подложки). Транспортирующий газ используется для переноса порошка в лазерный луч из дозирующего устройства, а защитный газ предотвращает загрязнение линзы.

1.2. Оптическая схема диагностики параметров частиц в двухфазном потоке

Для измерения скорости и температуры одиночных частиц разработан лазерно-оптический диагностический комплекс, который представляет собой комбинацию лазерного двухфокусного L2F-анемометра и пирометра на базе малогабаритного спектрометра [17]. Такая система совмещает возможности диагностических систем, разработанных для изучения как холодных, так и горячих гетерогенных потоков. Методика диагностики объединяет два независимых метода измерения скорости частиц: пассивный, основанный на собственном излучении нагретых частиц в газовом потоке, и активный, использующий влияние рассеивания луча лазерного диода. В качестве внешнего источника излучения используется одночастотный одномодовый лазерный диод LD, генерирующий линейно поляризованное излучение

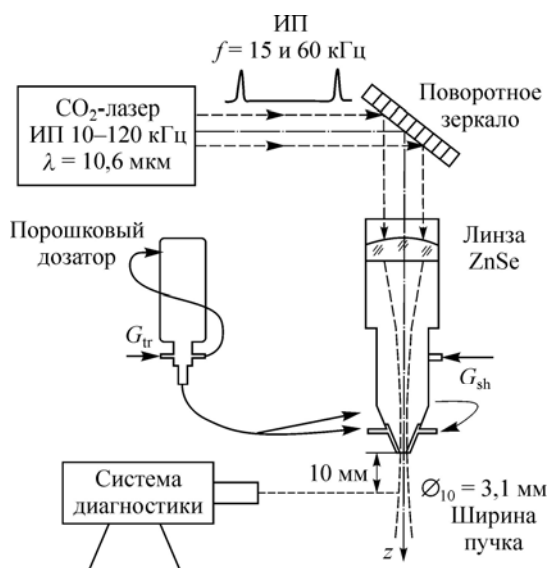


Рис. 1. Схема измерений скорости и температуры частиц порошка в поле лазерного излучения.

с длиной волны $\lambda = 532$ нм мощностью до 150 мВт. Для формирования лазерных перетяжек применяются четвертьволновая пластинка Q и призма Волластона PR. Первая преобразует исходное излучение в излучение с круговой поляризацией, а вторая предназначена для углового разделения 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 составляет ~ 1 мм, мощность в каждой перетяжке ~ 20 мВт.

Схемная реализация позволяет принимать рассеянное на частице излучение в обратном направлении под углом $\sim 150^\circ$ к оптической оси спектрометра. В качестве входной щели спектрометра используется двойная щелевая диафрагма SD (со щелями S1 и S2), расположенная вертикально (рис. 2). Изображение 115 мкм-го отверстия в измерительном объеме совмещено с первой перетяжкой двухфокусного анемометра. Изображение прямоугольной 810 мкм-ой щели 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. Форма решетки позволяет упростить стандартную схему монохроматора [22]. 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. 3а) для последующего определения температуры частицы. Изображение светящейся частицы, находящейся в измерительном объеме, проецируется с помощью объектива O_1 на входную щель спектрометра (рис. 2). 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

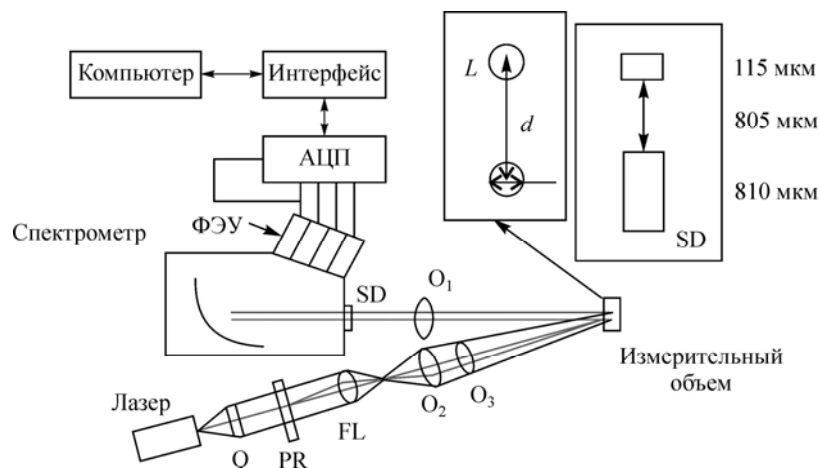


Рис. 2. Оптическая схема диагностического комплекса.

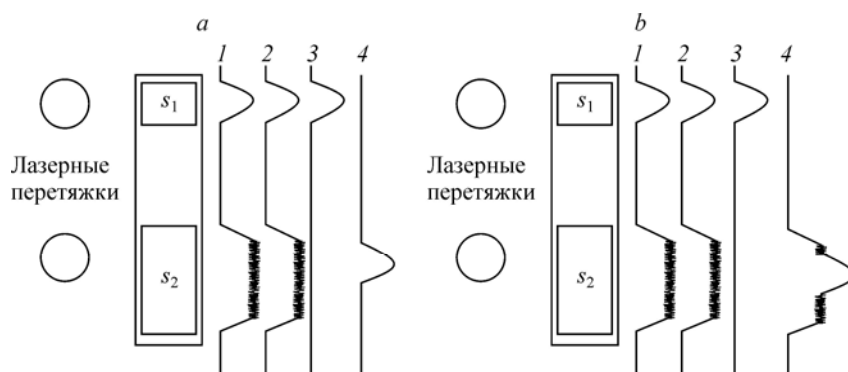


Рис. 3. Схема измерительного объема.
 S_1, S_2 — щели 1 и 2 двухщелевой диафрагмы, 1–4 — номера оптических трактов.

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 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 $\lambda_3 = 532$, была введена третья полоса. Ширина пропускания составляла ~ 20 нм. Коэффициент пропускания фильтра известен. В случае трехцветовой пирометрии сигналы имеют вид, изображенный на рис. 3b. Увеличение цветов приводит к повышению точности измерения температуры благодаря избыточной информации [23].

Для экспериментальной оценки погрешностей была построена модель частицы, пролетающей через измерительный объем с заданной скоростью и температурой, по схеме, представленной на рис. 4.

Температура на лампе СИ 10-300 выставлялась по току, соответствующему температуре ленты накаливания 2133 К. Измерения температуры проводились методами двухцветовой и трехцветовой пирометрии. Средние значения температуры, полученные с помощью этих методов, составили соответственно 2152 ± 117 К и 2146 ± 77 К (рис. 5), а относительные инструментальные погрешности измерения температуры — соответственно 5,4 и 3,6 %. Методическую погрешность в рассматриваемом случае нельзя точно определить из-за ее малости при измерении по излучению материала, по которому проводилась калибровка. Поэтому ее оценка проведена по отношению средних значений температуры T_p частицы-модели и температурой, выставленной на лампе СИ 10-300. Для двухцветовой пирометрии ее значение составило 0,9 %, для трехцветовой — 0,6 %.

Для оценки погрешности измерения скорости были проведены тестовые измерения скорости модели частицы. Средняя скорость модели частицы составила $10,0 \pm 0,3$ м/с (рис. 6). Измерив период вращения диска, можно верифицировать полученное значение. Частота вращения диска $\nu = 62,5$ Гц. Соответственно скорость движения отверстия, моделирующего частицу, $v_p = 10,15 \pm 0,06$ м/с.

Измерения позволяют сопоставить одиночной частице, пролетевшей через измерительный объем, скорость, измеренную L2F-анемометром, если частица последовательно пересекла две лазерные перетяжки (рис. 3,

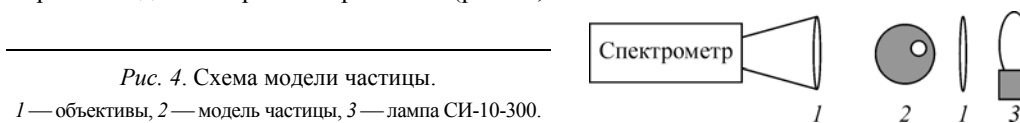


Рис. 4. Схема модели частицы.
 1 — объективы, 2 — модель частицы, 3 — лампа СИ-10-300.

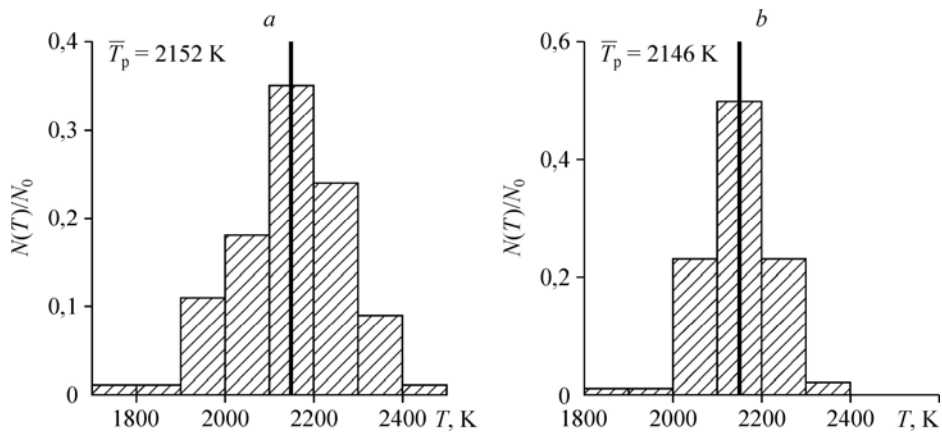


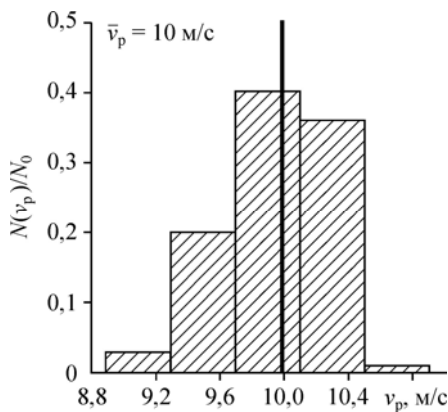
Рис. 5. Результаты тестовых измерений температуры методами двухцветовой (а) и трехцветовой (б) пирометрии.

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 (~ 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.

1.3. Постановка экспериментов

Измерения скорости и температуры частиц проводились по схеме, представленной на рис. 1. Схема диагностического комплекса для регистрации параметров частиц в полете представлена на рис. 2. Метрологические характеристики, анализ погрешности и более подробное описание схемы работы измерительного комплекса, использованного в эксперименте, представлены в работе [18]. Для подачи порошка в лазерный луч использовалось коаксиальное сопло (рис. 7). Предварительно была проведена адаптация регистрирующей системы к условиям воздействия на материалы импульсно-периодического лазерного излучения средней мощностью до 1050 Вт.

В качестве рабочих газов использовались воздух ($G_{tr} = 0,33$ г/с, $G_{sh} = 0,15$ г/с), азот ($G_{tr} = 0,33$ г/с, $G_{sh} = 0,15$ г/с), аргон ($G_{tr} = 0,30$ г/с, $G_{sh} = 0,13$ г/с). Среднемассовые значения скорости транспортирующего газа составляли от 16 до 28 м/с, скорости газа в области смешения осевого и транспортирующего газов — порядка 5–8 м/с.



2. Результаты и обсуждение

С целью исследования влияния поля лазерного излучения на поведение частиц эксперименты проводились в двух режимах: без излучения (режим I) и в условиях действия

Рис. 6. Результаты измерений скорости частицы по схеме на рис. 4.

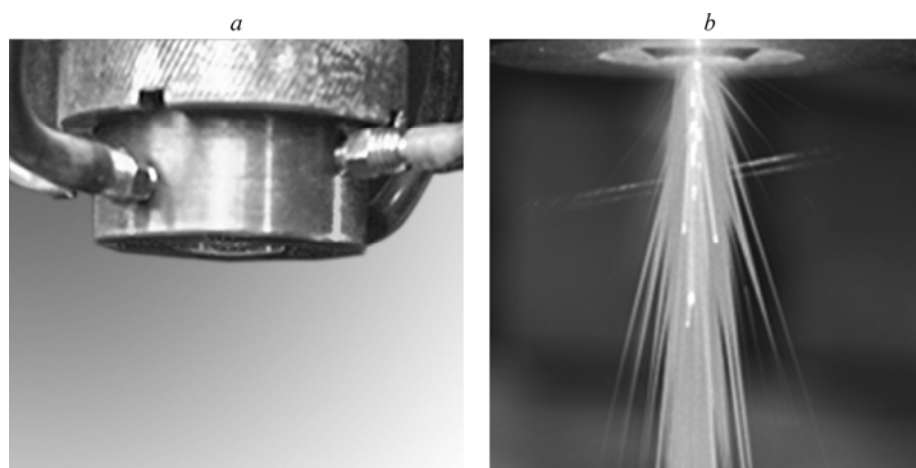


Рис. 7. Коаксиальное сопло.

a — внешний вид, *b* — двухфазный поток в световом поле CO₂-лазера и его диагностика.

импульсно-периодического излучения CO₂-лазера (режим II). Частота повторения импульсов устанавливалась 15 и 60 кГц. Форма лазерных импульсов представлена на рис. 8. На частоте 15 кГц средняя мощность излучения составила 950 Вт, длительность пика модулированной добротности составила ~400 нс при полной длительности импульса ~20 мкс. На частоте 60 кГц средняя мощность излучения была равна 1050 Вт, длительность импульса на полувысоте составила ~200 нс. Таким образом, импульсная мощность изменялась от 40 до 90 кВт при 15 и 60 кГц соответственно. Причем при пиковой мощности импульса модулированной добротности (~40 кВт на частоте 15 кГц) средняя мощность в квазистационарном «хвосте» импульса составила ~3,1 кВт. Измерения проводились на центральной оси симметрии сопла на расстоянии 10 мм от его среза. Диаметр перетяжки в этой точке составлял 3,1 мм. Таким образом, плотность мощности излучения в импульсном режиме может достигать 11 ГВт/м².

В экспериментах использовались порошки алюминия (Al), оксида алюминия (Al₂O₃), молибдена (Mo) и никеля (Ni). Предварительный анализ морфологии порошков производился с помощью электронного микроскопа фирмы Zeiss, Германия. Микрофотографии частиц и дисперсный состав, который определялся с использованием лазерного дифракционного анализатора (Laser Diffraction Particle Size Analyzer, LS 1332), приведены в табл. 1. В качестве рабочих газов использовались: воздух — для порошка Al₂O₃, азот и/или аргон — для порошков Al, Mo и Ni. Теплофизические свойства материала частиц и соответствующие расходы газов представлены в табл. 2.

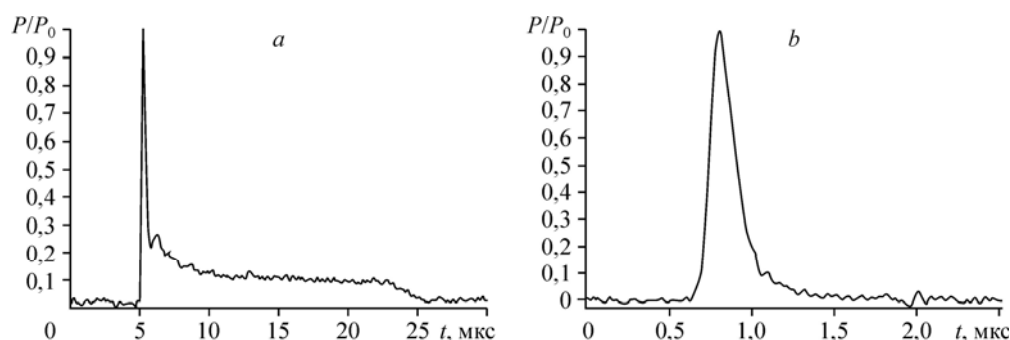
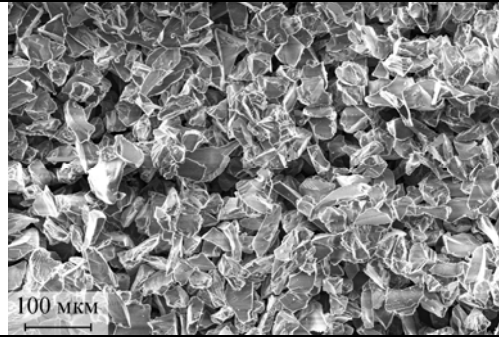
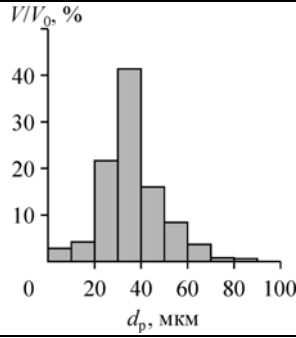
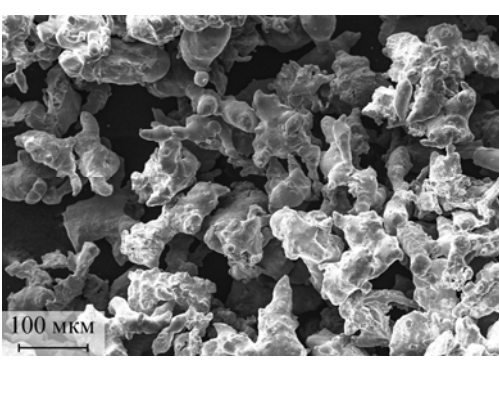
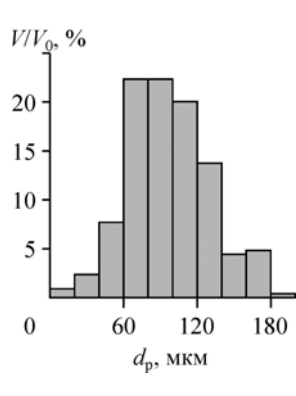
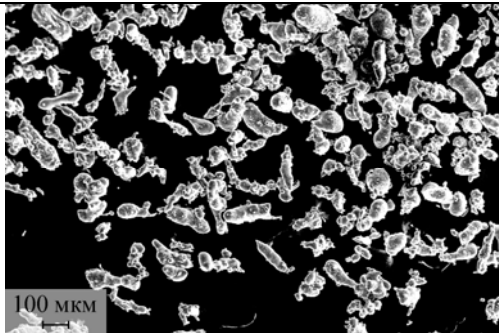
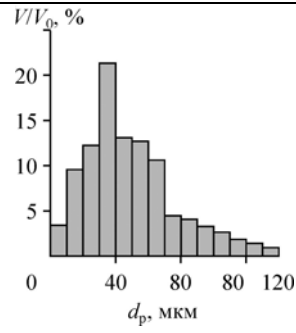
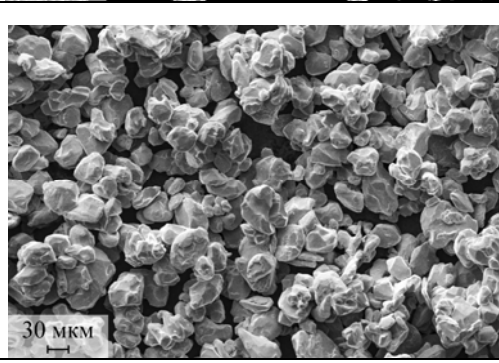
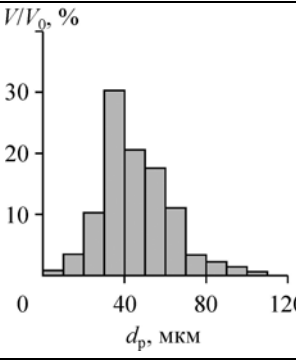


Рис. 8. Форма лазерных импульсов в зависимости от частоты повторения.

a — 15 кГц, $\bar{P}_{\text{pulse}} = 40$ кВт, $\bar{P}_{\text{pulse tail}} = 3,1$ кВт; *b* — 60 кГц, $\bar{P}_{\text{pulse}} = 90$ кВт.

Таблица 1

СЭМ* -фотографии порошков и их распределения по размерам

Порошок	СЭМ-фотографии	Объемное распределение частиц по размеру
Оксид алюминия (Al_2O_3)		
Никель (Ni)		
Алюминий (Al)		
Молибден (Mo)		

*СЭМ — сканирующая электронная микроскопия.

Таблица 2

Теплофизические свойства материалов частиц и расходы используемых рабочих газов

Материал/вещество	Al	Al ₂ O ₃	Ni	Mo	Air	N ₂	Ar
Плотность ρ , кг/м ³	2700	3970	8900	10220	1,20	1,25	1,78
Температура плавления/кипения, К	933/2792	2323/3250	1720/3000	2850/4885	–	–	–
Средний диаметр частиц d_p , мкм	50	34	100	45	–	–	–
Расход защитного газа G_{sh} , г/с	–	–	–	–	0,15	0,15	0,13
Расход транспортирующего газа G_{tr} , г/с	–	–	–	–	0,33	0,33	0,3
Расход порошка G_p , г/мин	6,6	1,5–4,5	50	35	–	–	–

Импульсно-периодический режим демонстрирует высокую плотность излучения в импульсе по сравнению с режимом постоянного излучения [16]. Были получены статистические распределения частиц оксида алюминия Al₂O₃ по скорости и температуре (рис. 9). Частота повторения импульсов составляла 60 кГц. При средней мощности $P = 900$ Вт средняя импульсная мощность $\bar{P}_{pulse} = 75$ кВт, плотность излучения $W = 10$ ГВт/м². В распределении частиц по скорости и температуре присутствовало несколько локальных максимумов. Скорости 7,5 % частиц от числа всех зарегистрированных в измерительном объеме превысили 60 м/с.

На рис. 10 представлены статистические распределения частиц оксида алюминия Al₂O₃ по скорости и температуре. Частота повторения импульсов составляла 15 кГц, средняя мощность $P = 950$ Вт, $t_{pulse} = 400$ нс, мощность в импульсе модулированной добротности $\bar{P}_{pulse} = 40$ кВт, плотность излучения $W = 5,2$ ГВт/м². Однако основная энергия импульса приходится на «хвост» (рис. 8), и в этом случае средняя импульсная мощность составляет $\bar{P}_{pulse\ tail} = 3,1$ кВт, плотность излучения $W = 0,4$ ГВт/м². В распределении частиц по скорости и температуре присутствуют несколько локальных максимумов. Количество частиц со значениями скорости, превышающими 60 м/с, значительно меньше, чем при частоте 60 кГц — порядка 1 % от общего числа частиц, зарегистрированных в измерительном объеме.

Во всех режимах излучения увеличение среднего значения скорости при включении лазера в режиме II достигается ускорением всех частиц, что можно видеть по сдвигу статистического распределения в сторону больших скоростей. В режиме II в статистических распределениях температуры локальные максимумы совпадают с точками плавления

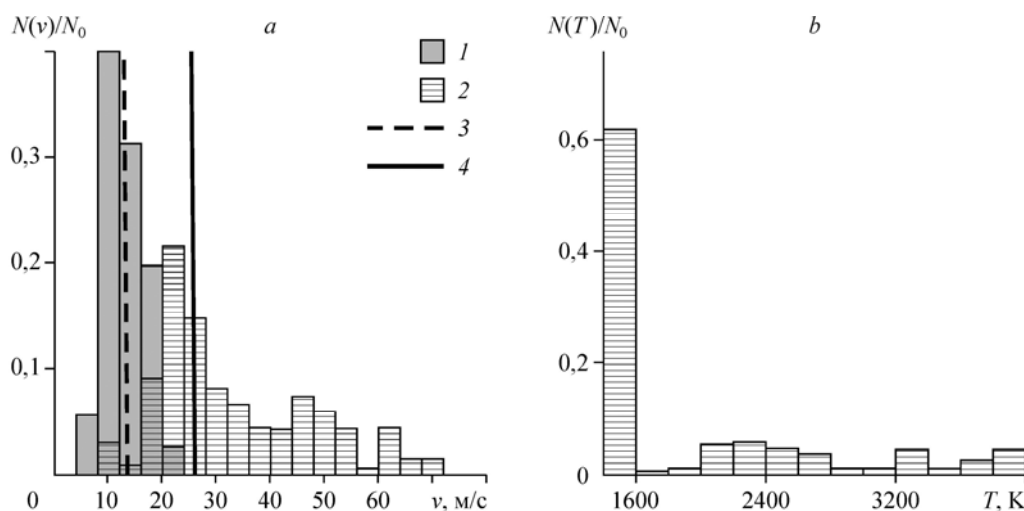


Рис. 9. Статистические распределения частиц оксида алюминия (Al₂O₃) по скорости, полученные в режиме I в отсутствие лазерного излучения и в режиме II при наличии импульсного излучения в среде воздуха с частотой импульсов $f = 60$ кГц и длительностью импульсов 200 нс (а), и по температуре, полученные в режиме II (б).

Режимы: I (1) и II (2); $V_I = 13$ м/с (3), $V_{II} = 26$ м/с (4).

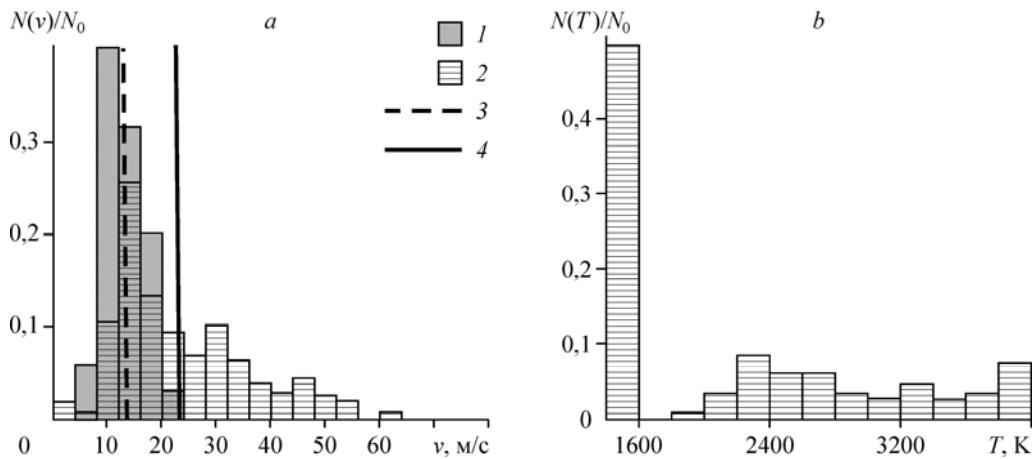


Рис. 10. Статистические распределения частиц оксида алюминия (Al_2O_3) по скорости, полученные в режиме I в отсутствие лазерного излучения и в режиме II при наличии импульсного излучения в среде воздуха с частотой импульсов $f = 15$ кГц и длительностью пика модулированной добротности 400 нс (а), и по температуре, полученные в режиме II (б). Режимы: I (1) и II (2); $V_I = 5,1$ м/с (3), $V_{II} = 14,8$ м/с (4).

и кипения Al_2O_3 . Это свидетельствует о выполнении закона Кирхгофа, несмотря на фазовые переходы, и о равновесности собственного излучения частицы.

На рис. 11 представлены статистические распределения частиц никеля Ni по скорости. Частота повторения импульсов составляла 60 кГц, $P = 1050$ Вт, $t_{\text{pulse}} = 200$ нс, $\bar{P}_{\text{pulse}} = 87,5$ кВт, $W = 11,6$ ГВт/м². Видно, что в распределении частиц по скорости присутствует несколько локальных максимумов. Скорость отдельных частиц превышает 65 м/с. Среднее значение скорости 14,8 м/с, полученное в импульсно-периодическом режиме, значительно отличается от значения, полученного в режиме постоянного излучения (6,8 м/с). Таким образом, частицы никеля, несмотря на большую в 60 раз массу частиц среднего размера, чем у оксида алюминия, имеют наиболее интенсивное ускорение.

На рис. 12 показано статистическое распределение частиц молибдена (Mo) по скорости. Частота повторения импульсов составляла 60 кГц, $P = 1050$ Вт, $t_{\text{pulse}} = 200$ нс, $\bar{P}_{\text{pulse}} = 87,5$ кВт, $W = 11,6$ ГВт/м². Поведение частиц из тугоплавкого материала — молибдена — также изменяется под действием лазерного излучения и приводит к появлению «хвостов» в виде частиц с большей скоростью.

В статистических распределениях частиц алюминия Al по скоростям (рис. 13) присутствуют частицы с экстремально высокой скоростью в режиме II. Частота повторения импульсов составляла 50 кГц, $P = 950$ Вт, $t_{\text{pulse}} = 200$ нс, $\bar{P}_{\text{pulse}} = 95$ кВт, $W = 12,6$ ГВт/м². Результаты измерения скорости частиц в газодисперсном потоке, создаваемом коаксиальным соплом

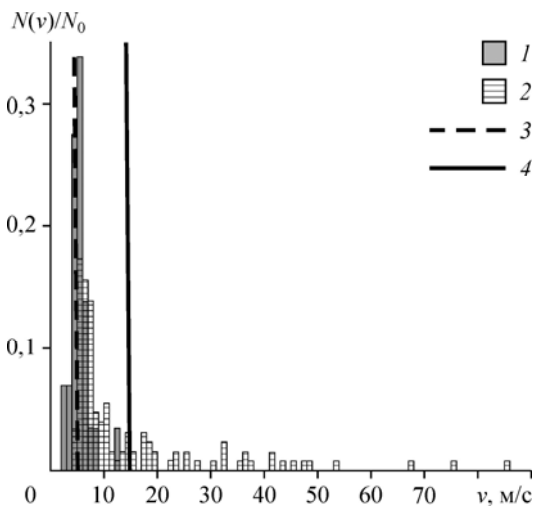


Рис. 11. Статистические распределения частиц никеля (Ni) по скорости, полученные в режиме I в отсутствие лазерного излучения и в режиме II при импульсном излучении в среде азота с частотой импульсов $f = 60$ кГц и с длительностью импульсов 200 нс.

Режимы: I (1) и II (2); $V_I = 5,1$ м/с (3), $V_{II} = 10,7$ м/с (4).

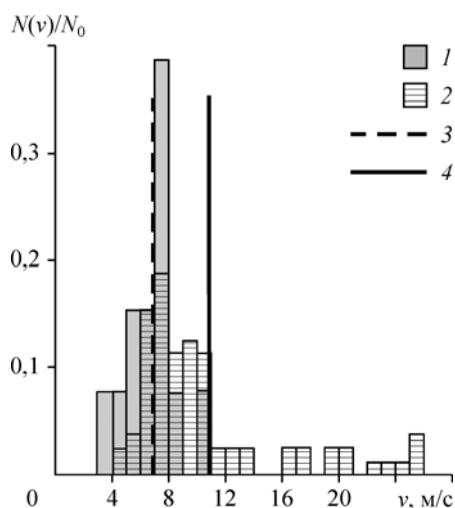


Рис. 12. Статистические распределения частиц молибдена по скорости, полученные в режиме I в отсутствие лазерного излучения и в режиме II при импульсном излучении в среде азота с частотой импульсов $f = 60$ кГц и длительностью импульсов 200 нс. Режимы: I (1) и II (2); $V_I = 6,7$ м/с (3), $V_{II} = 10,7$ м/с (4).

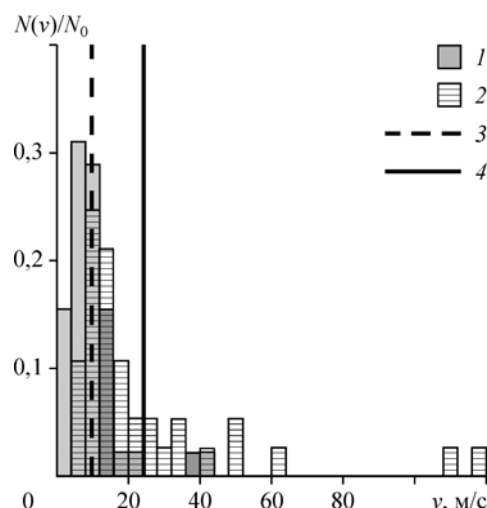


Рис. 13. Статистические распределения частиц алюминия по скоростям, полученные в режиме I в отсутствие лазерного излучения и в режиме II при импульсном излучении. Рабочий газ азот; режимы: I (1) и II (2); $V_I = 9,9$ м/с (3), $V_{II} = 24,1$ м/с (4).

Таблица 3

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

Материал порошка	Al ₂ O ₃	Mo	Ni		Al	
Рабочий газ	воздух	N ₂	N ₂	Ar	N ₂	Ar
v_{II}^* , 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)	26 (10) 23 (5,2)	10,7 (11,6)	14,8 (11,6)	–	24,1 (12,6)	27,6 (12,6)

* v_{II}^* — среднemasовая скорость газа в транспортирующем канале.

под воздействием импульсно-периодического излучения CO₂-лазера, сведены в табл. 3. Из статистических распределений видно, что максимальное увеличение скорости наблюдается для частиц Mo (до 60 м/с) и Al₂O₃ (до 50 м/с). Импульсный режим CO₂-лазера за счет высокой плотности интенсивности излучения в импульсе оказывает значительное влияние на поведение частиц независимо от типа порошка. Показано, что среднее значения скорости частиц Mo увеличивается с 6,7 до 10,7 м/с, Ni — с 5,1 до 14,8 м/с, Al — с 9,9 до 27,6 м/с, Al₂O₃ — с 13 до 26 м/с.

Выводы

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 применением 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.

С помощью разработанных средств диагностики 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 импульсного (с частотой 60 кГц и мощностью в импульсе ~ 90 кВт) СО₂-лазерного излучения. Зарегистрированы эффекты лазерного (за счет давления отдачи паров) ускорения частиц, которые зависят от теплофизических свойств материалов и характеристик излучения.

Список литературы

1. Lepski D., Bruckner F. Laser cladding // The Theory of Laser Materials Processing (Heat and Mass Transfer in Modern Technology) / Ed. J.M. Dowden. Springer Series in Material Sci. 119. Springer, 2009. P. 235–279.
2. Lyagushkin V.P., Solonenko O.P. A method to simultaneously measure the velocity and temperature of disperse particles in high temperature flows // Proc. 7th Intern. Symp. on Plasma Chemistry, Eindhoven, Netherlands, 1985. Vol. 3. P. 730–735.
3. Mauer G., Vaben R., Zimmermann S., Biermordt T., Heinrich M., Marques J.-L., Landes K., Schein J. Investigation and comparison of in-flight particle velocity during the plasma-spray process as measured by laser doppler anemometry and DPV-2000 // J. Thermal Spray Technol., 2013. Vol. 22, No. 6. P. 892–900.
4. Meriaudeau F., Renier E., Truchetet F. CCD technology applied to laser cladding // Proc. of SPIE. 1996. Vol. 2654. P. 299–309.
5. Tan H., Zhang F., Wen R., Chen J., Huang W. Experiment study of powder flow feed behavior of laser solid forming // J. Optics & Laser in Engng. 2012. Vol. 50. P. 391–398.
6. Zhang F., Chen J., Tan H., Lin X., Huang W. Composition control for laser solid forming from blended elemental powders // J. Optics & Laser Technology. 2009. Vol. 41. P. 601–607.
7. Meriaudeau F., Truchetet F., Aluze D., Dumont C. Machine vision system applied to the characterization of a powder stream: application to the laser cladding process // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3306. P. 22–31.
8. Liu W., Xu B., Dong Sh., Yan Sh. Characteristic analysis of the gas-powder stream for laser cladding // Proc. of the FISITA 2012 World Automotive Congress Lecture Notes in Electrical Engng. 2013. Vol. 199. P. 99–107.
9. Meriaudeau F., Truchetet F. Image processing applied to laser cladding process // Proc. of SPIE. 1996. Vol. 2789. P. 93–103.
10. Meriaudeau F., Renier E., Truchetet F. CCD technology applied to laser cladding // Proc. of SPIE. 1996. Vol. 2654. P. 299–309.
11. Meriaudeau F., Truchetet F., Dumont C. High-speed photography applied to laser cladding // Proc. of SPIE. 1997. Vol. 2869. P. 994–1003.
12. Kebbel V., Geldmacher J., Partes K., Juptner W. Characterization of high-density particle distributions of optimization of laser cladding processes using digital holography // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5856. P. 856–864.
13. Goela J.S., Green B.D. Ablative acceleration of small particles to high velocity by focused laser radiation // J. of Optical Society of America B. 1986. Vol. 3, No. 1. P. 8–14.
14. Захаров С.Д., Казарян М.А., Коротков Н.П. Ударный разгон частиц в поле лазерного излучения // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60, № 5. С. 317–319.
15. Kovaleva I.O., Kovalev O.B. Simulation of the acceleration mechanism by light-propulsion for the powder particles at laser direct material deposition // J. Optics & Laser Technology. 2012. Vol. 44. P. 714–725.
16. 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.
17. Наливайко В.И., Чубаков П.А., Покровский А.И., Михальченко А.А., Кузьмин В.И., Картаев Е.В. Малогабаритный спектрометр для эмиссионного анализа потоков низкотемпературной плазмы // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 2. С. 257–267.
18. Михальченко А.А., Кузьмин В.И., Сергачев Д.В., Картаев Е.В., Иванчик И.С., Иванчик С.Н. Исследование динамики нагрева и ускорения частиц Al₂O₃ в осесимметричном гетерогенном потоке плазмотрона с межэлектродными вставками // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 4. С. 537–549.
19. Solonenko O.P., Mikhail'chenko A.A., Kartaeв E.V. Measuring velocity, surface temperature and size of single particle in plasma flow based on 3-color pyrometry // Proc. of the 5th JSME-KSME Fluids Engng Conference. Nagoya, Japan, 2002, 5 p. (CD).
20. Стаценко П.А., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Мякушина А.А. Исследование пространственных характеристик излучения мощной СО₂-лазерной системы генератор-усилитель // Сб. докл. 22-й межд. конф. «Лазеры. Измерения. Информация. 2012». СПб, 2012. Т. 2. С. 168–176.
21. Kuz'min V.I., Mikhail'chenko A.A., Kovalev O.B., Kartaeв E.V., Rudenskaya N.A. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials // J. Thermal Spray Technol. 2012. Vol. 21. P. 159–168.
22. Сайдов Г.В., Свердлова О.В. Практическое руководство по молекулярной спектроскопии. Уч. пособие / Под ред. Н.Г. Бахшиева. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 136 с.
23. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2018 г.