



УДК 621.7; 669

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-47-54>

Научная статья

Research article



Траектория движения частиц титанового порошка различной фракции в плазменном потоке

Р. А. Окулов^{1, 2}, С. М. Ахметшин¹, Б. Р. Гельчинский¹, А. А. Ремпель¹¹ Институт металлургии Уральского отделения РАН
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19✉ okulov.roman@gmail.com

Аннотация. Исследованы траектории движения частиц порошка в плазменном потоке, который используется для процессов нанесения функциональных покрытий и получения порошков. Выполнен обзор современных научных исследований, посвященных моделированию рассматриваемых процессов. Цель работы заключалась в определении влияния размера частиц порошка, используемого в качестве сырья, на траекторию движения частиц в плазменном потоке, направленном вертикально вверх. Исследовали три фракции титанового порошка: 1, 50 и 100 мкм, выбранные исходя из производственной практики ведения рассмотренных процессов и результатов гранулометрического состава порошкового материала, использованного в натурном эксперименте, при помощи специализированного оборудования CAMSIZER-XT. В работе продемонстрировано, каким образом размер частиц порошка влияет на угол раскрытия, длину и ширину светящейся фракции плазменного факела, а также удаленность увлеченных плазменным потоком частиц от плазменной головки. Исследование выполнено с помощью компьютерного эксперимента с последующей верификацией путем проведения натурного эксперимента для каждого из рассматриваемых случаев. При этом использовалась лабораторная плазменная установка МАК-10 (ИМЕТ УрО РАН), применяемая для получения порошков и нанесения функциональных покрытий. С целью надежного получения итогов измерений была проведена статистическая обработка результатов натурного эксперимента методом точечных диаграмм размахов и определения их средних значений. Результаты сравнительного анализа итогов натурного и компьютерного экспериментов показали удовлетворительную сходимость. Сравнительный анализ применения трех фракций порошка позволил разработать практические рекомендации по совершенствованию оборудования и технологии ведения рассматриваемых процессов. В статье описана компьютерная модель, позволяющая прогнозировать размеры реактора (камеры приема порошкового материала), рациональную форму составных частей плазменной установки и положение подложки, на которую наносится функциональное покрытие. Представленную модель можно использовать для решения задач, подобных поставленной в рамках данного исследования, с целью управления процессами нанесения покрытий и получения порошка.

Ключевые слова: сила тяжести, траектория движения частиц, плазменный метод, получение порошков, нанесение покрытий

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-43-00015.

Для цитирования: Окулов Р.А., Ахметшин С.М., Гельчинский Б.Р., Ремпель А.А. Траектория движения частиц титанового порошка различной фракции в плазменном потоке. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023;17(3):47–54. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-47-54>

Trajectories of titanium powder particles of different size in a plasma flow

R. A. Okulov^{1, 2}, S. M. Akhmetshin¹, B. R. Gelchinsky¹, A. A. Rempel¹¹ Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russia² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russia

✉ okulov.roman@gmail.com

Abstract. The study focused on analyzing the trajectories of powder particles within a plasma flow, a process utilized for applying functional coatings and producing powders. An overview of contemporary scientific research dedicated to modeling these processes is presented. The primary objective of this study was to ascertain how the particle size of the powder, used as a raw material, influences the path of particles within a vertically directed plasma flow. We examined three sizes of titanium powder: 1 μm , 50 μm and 100 μm . These sizes were chosen based on production practices for the considered processes and the particle size distribution of the powder material used in full-scale experiments, employing specialized CAMSIZER-XT equipment. Our study reveals the significant impact of powder particle size on various parameters, including the opening angle, length, and width of the illuminated section of the plasma torch, as well as the distance traveled by particles entrained by the plasma flow from the plasma head. To investigate these effects, we conducted computer simulations, followed by validation through full-scale experiments for each case. Specifically, we employed the MAK-10 laboratory plasma facility at the Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, which is designed for powder production and functional coatings. In order to ensure the reliability of our measurements, we performed statistical data processing of the full-scale experiment results using scatter plots and determination of their average values. The comparative analysis of results from both natural and computer experiments demonstrated a satisfactory level of convergence. This comparative analysis of three particle sizes of powder enabled us to formulate practical recommendations for enhancing equipment and process technology in the context of the considered procedures. Furthermore, our article introduces a computer model capable of predicting the dimensions of the reactor (the chamber for receiving powder materials), the optimal shape of components within the plasma facility, and the positioning of the substrate on which functional coatings are applied. This model can be applied to address similar problems within the scope of this study, facilitating the control of coating application processes and powder production.

Keywords: gravity force, particle trajectory, plasma method, powder production, coating application

Acknowledgements: This research received support from the Russian Science Foundation, project No. 21-43-00015.

For citation: Okulov R.A., Akhmetshin S.M., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Trajectories of titanium powder particles of different size in a plasma flow. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(3):47–54. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-47-54>

Введение

Плазменное напыление является одним из эффективных способов получения функциональных покрытий [1; 2]. Контролируя параметры плазмы и условия напыления, можно получить качественные покрытия [3]. Существует значительное количество работ, посвященных анализу влияния параметров процесса напыления на свойства получаемых функциональных покрытий [4–6]. Плазменное распыление является методом производства порошков, используемых в аддитивных технологиях [7–10].

Метод конечных элементов – удобный и точный инструмент для прогнозирования и установления роли воздействующих факторов на процессы получения порошка и нанесения покрытий. Компьютерное моделирование широко востребовано для изучения функциональных покрытий из высокоэнтропийных сплавов, например GdTbDyHoSc и GdTbDyHoY [11]. Для моделирования процессов нанесения покрытий в работах [12–14] использованы программные пакеты ANSYS, SolidWorks и JmarPro. Для моделирования процессов получения порошков плазменным методом применяют ANSYS [15], FLOW-3D [16] и COMSOL [17].

Траектория движения частиц в плазменном потоке оказывает влияние на характеристики покрытий и свойства получаемых порошков, а на нее, в свою очередь, влияет размер частиц порошка, используемого в качестве сырья. Среди воздействующих факторов также можно отметить форму внутреннего канала, которая описывается входящими в состав

плазменной головки составных частей, технологические особенности функционирования установки. В опубликованной литературе можно найти сведения о влиянии формы сопла [18], режимов работы [19], способа ввода порошкового материала [20], использования межэлектродной вставки [21] и формы газовых завихрителей [22], однако недостаточно освещено влияние размеров частиц порошкового материала на траекторию их движения в плазменном потоке.

Целью данной работы являлось определение влияния трех фракций (1, 50 и 100 мкм) титанового порошка, используемого в качестве сырья, на траекторию движения частиц в плазменном потоке, направленном вертикально вверх.

Методика исследования

Была создана компьютерная модель плазменной установки, позволяющая прогнозировать параметры плазменного потока, и применен метод конечных элементов с использованием программного пакета SolidWorks Flow Simulation (версия 2016 г.), который зарекомендовал себя как удобный инструмент для вычислительной гидродинамики (CFD), с последующей проверкой результатов компьютерного эксперимента. При решении численным методом применяются уравнения Эйлера и Навье-Стокса. Для учета поверхностных, подповерхностных и срединных процессов, происходящих в потоке, размер конечных элементов сетки разбиения 0,24 мм выбран таким образом, чтобы в наиболее узком месте трехмерной компьютерной модели плазматрона (канал ввода

плазмообразующего газа завихрителя диаметром 2 мм) размещались как минимум 8 элементов [23].

Для проведения компьютерного эксперимента создана трехмерная модель на основе лабораторной установки МАК-10, собранной на базе ИМЕТ УрО РАН, описание конструкции и параметров которой представлено на рис. 1.

В качестве исходных данных для компьютерного эксперимента принято:

- расход плазмообразующего газа – 20 л/мин;
- тип газа – аргон;
- давление газа в системе подачи – 2 атм;
- диаметр центрального отверстия завихрителей – 24 мм;
- ввод плазмообразующего газа происходит по тангенциальной схеме через 6 каналов диаметром 2 мм;
- в качестве сырья из библиотеки стандартных материалов программного пакета выбран титановый порошок ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) (мас. %, не более: N – 0,04, C – 0,07, H – 0,01, Fe – 0,25, Ni – 0,04, Si – 0,1, O – 0,2).

Условия наружной среды приняты следующими:

- тип газа – воздух;
- абсолютное давление газа на выходе из анодного узла составляет 98 100 Па, что соответствует высоте расположения г. Екатеринбург;
- температура соответствует комнатной – 293 К.

Траекторию движения частиц в плазменном потоке изучали для частиц размерами 1, 50 и 100 мкм. Массовый расход для каждой фракции составлял 1 г/с.

Применен плазматрон косвенного действия:

- напряжение – 26 В;
- ток – 250 А;
- направление распыления – вертикально вверх;
- длина реактора – 2,8 м;

- диаметры соответствующих участков – 250 и 500 мм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены траектории 100 частиц для каждой из трех фракций, размер которых не соответствует масштабу и выбран условно. Принято, что температура, при которой происходит свечение титанового порошка и видны яркие искры, выше 1573 К. При определении ее значения руководствовались справочными данными о цветах калия титана (ярко-красный – 900 °С, желтый – 1200 °С, белый – 1300 °С) [24]. В результате компьютерного моделирования установили длину и ширину факела со светящейся фракцией порошка, температура которой превышает 1573 К, а также максимальную удаленность полета частиц порошка в потоке.

Полученные данные представлены ниже:

Размер частиц порошка, мкм	1	50	100
Длина светящейся фракции, мм	570	500	320
Ширина светящейся фракции, мм	45	55	60
Удаленность частиц от торца плазматрона, м	2,8	1,8	1,6

Как видно, с увеличением размера частиц уменьшаются длина светящейся фракции и удаленность увлеченных потоком частиц от торца плазматрона, при этом ширина и угол раскрытия факела плазменного потока возрастают. Это обусловлено влиянием силы тяжести, действующей на частицы порошка, увлеченные плазменным потоком. Выявлено, что чем меньше масса частицы порошка, тем длиннее ее траектория полета в потоке и больше удаленность от плазменной головки.

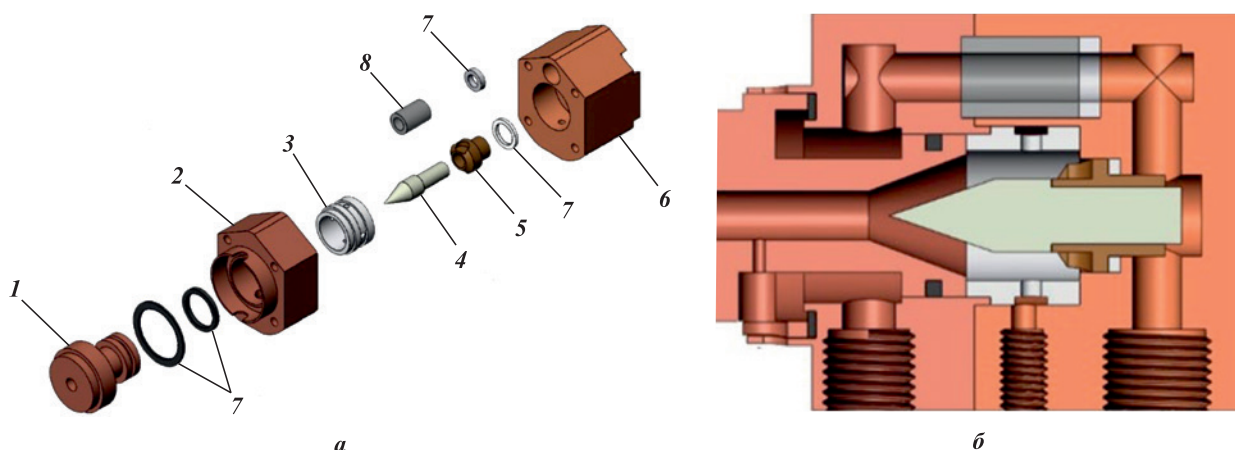


Рис. 1. Конструкция плазменной головки установки в разобранном состоянии (а) и в поперечном сечении вдоль оси (б)
1 – анод, 2 – корпус анода, 3 – завихритель, 4 – катод, 5 – втулка катода, 6 – корпус катода, 7 – уплотнительные кольца, 8 – втулка

Fig. 1. The design of the plasma head of the installation in a disassembled state (a) and in cross section along the axis (b)
1 – anode, 2 – anode case, 3 – swirler, 4 – cathode, 5 – cathode sleeve, 6 – cathode case, 7 – sealing rings, 8 – sleeve

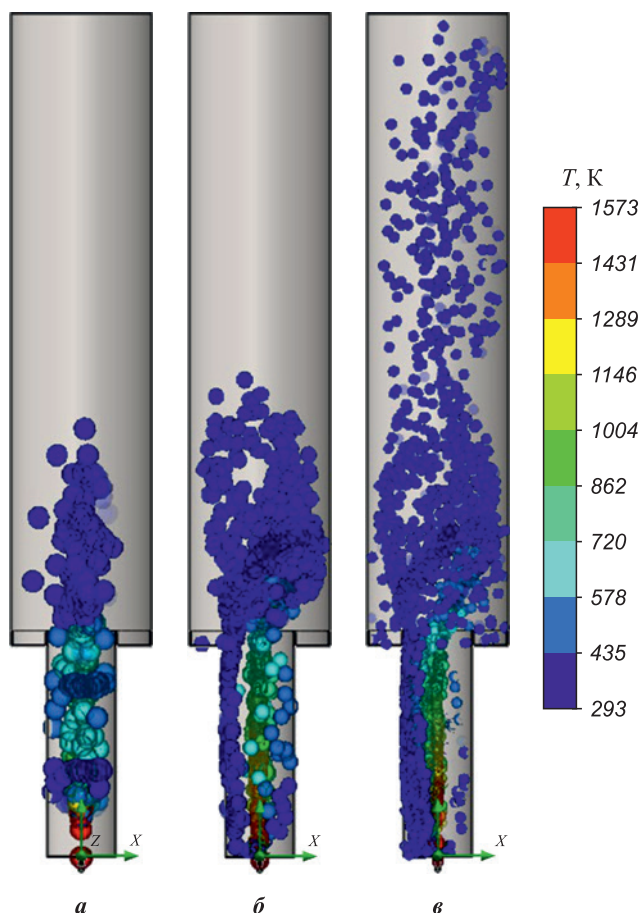


Рис. 2. Картины траекторий частиц размерами 100 (а), 50 (б) и 1 (в) мкм

Fig. 2. Trajectories of particles with sizes of 100 (a), 50 (б), and 1 (в) μm

Верификация результатов компьютерного эксперимента выполнена путем проведения двух натурных экспериментов. Цель первого из них заключалась в сравнении ширины и длины факела со светящимися частицами распыляемого на лабораторной установке титанового порошка ПТМ-1 (ТУ 14-22-57-92). По химическому составу он соответствует титановому порошку ВТ1-0, принятому в компьютерном эксперименте (мас. %, не более: N – 0,08, C – 0,05, H – 0,35, Fe + Ni – 0,4, Si – 0,1, Ca – 0,05, Cl – 0,004). Второй натурный эксперимент призван определить температуру плазменного потока при холостом режиме работы плазматрона (без распыления в ней частиц порошка), что позволит оценить, насколько ее значение, определенное в результате компьютерного эксперимента, соответствует фактическому.

Для каждого из натурных экспериментов проведено по 5 исследований. С целью получения надежных результатов измерений была выполнена статистическая обработка с использованием метода точечных диаграмм размахов с определением их средних значений [25–27].

Для первого натурального эксперимента выполнен гранулометрический анализ титанового порошка ПТМ-1 при помощи CAMSIZER-XT (Германия). Согласно полученным данным 90 % порошка имеют размер менее 91 мкм, 50 % – менее 50 мкм. При этом 98,1 % порошкового материала обладают сферичностью, превышающей коэффициент 0,9 (отношение наименьшего размера (диаметра) частицы к наибольшему), а 90,9 % исследованного порошка имеют сферичность с коэффициентом выше 0,9. Диапазон разброса размеров частиц титанового порошка ПТМ-1 лежал в пределах 1–97 мкм. На рис. 3 представлены данные натурального и компьютерного экспериментов.

При выполнении первого натурального эксперимента приняты следующие данные:

- расход плазмообразующего газа – 20 л/мин;
- тип газа – аргон чистотой 99,993 %, ГОСТ 10157-2016;
- давление газа в системе подачи – 2 атм;
- диаметр центрального отверстия завихрителей – 24 мм;

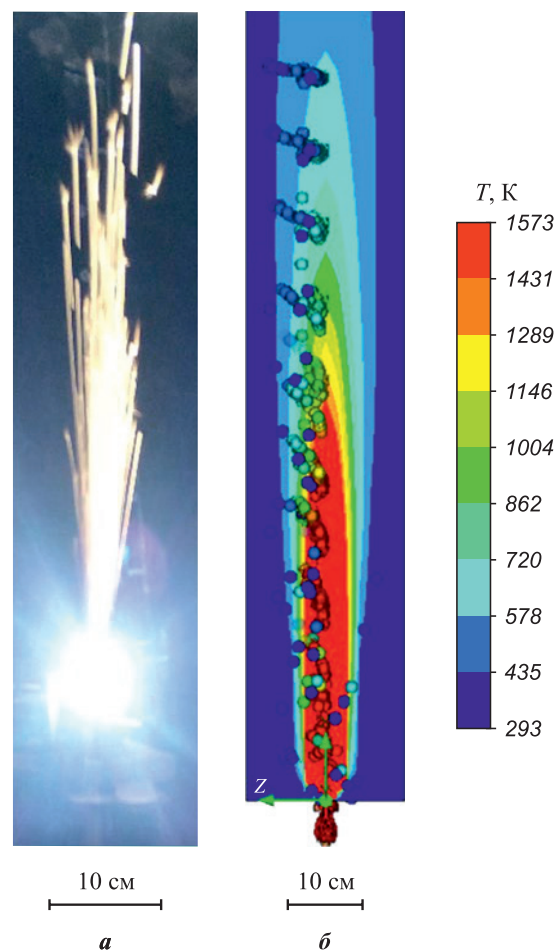


Рис. 3. Данные натурального (а) и компьютерного (б) экспериментов длины и ширины светящейся фракции

Fig. 3. Data from full-scale (a) and computer (б) experiments on the length and width of the luminous fraction

Результаты сравнения натурального и компьютерного экспериментов

Comparison of the results of full-scale and computer experiments

Материал	Компьютерный эксперимент, мм	Натурный эксперимент, мм	Отклонение, %
Медь М1	141	135	4,4
Сталь 10	82	85	3,5
Лантанированный вольфрам	19	20	5,0

• ввод плазмообразующего газа осуществлялся по тангенциальной схеме через 6 каналов диаметром 2 мм.

В качестве условий наружной среды принято:

- тип газа – воздух;
- абсолютное давление газа на выходе из анодного узла соответствует высоте расположения г. Екатеринбург и составляет 98 100 Па;
- температура соответствовала комнатной – 293 К.

Траекторию движения частиц в плазменном потоке устанавливали для частиц размерами от 1 до 97 мкм. Массовый расход для каждой фракции составлял 1 г/с. Применен плазматрон косвенного действия:

- напряжение – 26 В;
- ток – 250 А;
- направление распыления – вертикально вверх;
- длина реактора – 2,8 м;
- диаметры соответствующих участков – 250 и 500 мм.

Замеряли длину и ширину светящейся фракции титанового порошка, которые составили 600 и 65 мм соответственно. Таким образом, отклонение от результатов компьютерного эксперимента не превысило 7,7 %.

При проведении второго натурального эксперимента (холостой режим работы плазмотрона – без использования порошка) изучали температуру плазменного потока на его оси путем поочередного расположения на ней прутков с заведомо известной температурой плавления. Для этого были выбраны 3 прутка диаметром 3 мм из меди М1 (ГОСТ 859-2014), стали 10 (ГОСТ 1050-2013) и лантанированного вольфрама (ТУ 48-19-27-88), которые имели различную температуру плавления. Их поочередно фиксировали таким образом, чтобы один конец прутка был зафиксирован в зажиме, а второй, свободный, находился на оси плазменного потока. Головная часть плазмотрона крепилась в манипуляторе, который обеспечивал его равномерное перемещение вдоль оси по направлению к прутку со скоростью 10 мм/мин. Расстояние от свободного конца прутка до торцевой плоскости анода головной части плазмотрона регистрировалось. Начальное расстояние между свободным концом прутка и головной частью плазмотрона принято равным 0,5 м. В момент, когда на поверхности прутка начинается процесс плавления, зафиксировалось рас-

стояние от прутка до плазмотрона.

Для определения температуры поверхности прутка в месте начала плавления применили оптический пирометр (тип ЭОП-66 № 240, ГОСТ 5.278), который предназначен для точной оценки яркостных температур нагретых тел по их тепловому излучению в диапазоне от 900 до 10 000 °С. Погрешность измерения не превышает 5 °С.

При выполнении второго натурального эксперимента учтены следующие данные:

- расход плазмообразующего газа – 20 л/мин;
 - тип газа – аргон чистотой 99,993 % (ГОСТ 10157-2016);
 - давление газа в системе подачи – 2 атм;
 - диаметр центрального отверстия завихрителей – 24 мм;
 - ввод плазмообразующего газа по тангенциальной схеме через 6 каналов диаметром 2 мм.
- В качестве условий наружной среды принято:
- тип газа – воздух;
 - абсолютное давление газа на выходе из анодного узла соответствует высоте расположения г. Екатеринбург и составляет 98 100 Па;
 - температура соответствовала комнатной – 293 К.
- Применен плазматрон косвенного действия:
- напряжение – 26 В;
 - ток – 250 А;

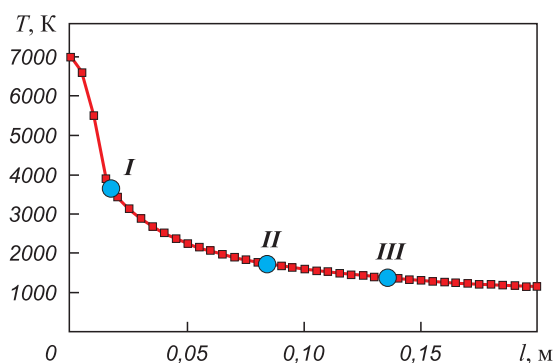


Рис. 4. Распределение температуры вдоль оси плазменного потока (l), по данным натурального эксперимента
I – лантанированный вольфрам, II – сталь 10, III – медь М1

Fig. 4. Temperature distribution along the plasma flow axis (l) according to full-scale experiment
I – lanthanated tungsten, II – steel 10, III – copper M1

- направление распыления – вертикально вверх;
- длина реактора – 2,8 м;
- диаметры соответствующих участков – 250 и 500 мм.

Полученные в результате второго натурного эксперимента данные показали, что у каждого из прутков плавление начинается при температуре, соответствующей справочным данным для каждого материала прутка с незначительным отклонением от нее и не превышающей 22 К. Подробное описание проведенного эксперимента представлено в работе [28]. Результаты приведены на рис. 4 и в таблице.

Таким образом, сравнительный анализ компьютерного и натурного экспериментов показал удовлетворительное согласие – расхождение не превышает 5 %.

Заключение

Проведен сравнительный анализ траектории движения частиц титанового порошка различной фракции в плазменном потоке, направленном вертикально вверх. Продemonстрировано, что от размера частиц порошка зависят длина и ширина сходящейся фракции, угол раскрытия плазменного факела, удаленность увлеченных плазменным потоком частиц от плазменной головки, что необходимо учитывать в процессах нанесения покрытий и производства порошка.

Создана компьютерная модель, описывающая лабораторную плазменную установку для нанесения функциональных покрытий и получения порошковых материалов. При производстве порошка эта модель может быть использована для прогнозирования итогов процесса распыления. На ее основе можно определить рациональную форму и размеры реактора (камеры приема распыляемого порошка): сократить внутренний объем и при этом избежать негативного эффекта налипания на внутренние поверхности стенок расплавленных частиц. Это важно для уменьшения металлоемкости технологического оборудования и габаритов установки, а также снижения затрат на их эксплуатацию при использовании инертных газов, которыми заполняется внутреннее пространство приемной камеры. Рациональная форма последней сокращает себестоимость единицы произведенного порошка и предотвращает загрязнение внутренних поверхностей реактора.

При направлении плазменного потока вертикально вверх из-за действия силы тяжести происходит естественная сепарация распыляемого порошка по фракциям: более мелкие частицы имеют больший радиус разброса, а крупные распределяются ближе к оси плазменной струи. Этот эффект можно использовать при сборе порошкового материала в зависимости от размера получаемых частиц. В качестве модернизации конструкции приемной камеры пред-

лагается предусмотреть в ее внутреннем пространстве дополнительные стенки, на которые будут оседать частицы заданного размера.

Таким образом, использование влияния силы тяжести при реализации схемы распыления по направлению вертикально вверх может быть дополнительным инструментом для сепарации производимого порошкового материала.

Итоги исследования будут полезны при нанесении функциональных покрытий, поскольку с их помощью можно определять рациональное положение подложки, на которую они наносятся. Компьютерная модель позволяет прогнозировать угол раскрытия факела плазменного потока и его ширину в зависимости от удаления от плазматрона. Руководствуясь полученными данными, можно оценить площадь наносимого покрытия и количество проходов плазматрона, требуемых для покрытия обрабатываемой поверхности, а также учесть температуру распыляемых частиц и определить рациональное расстояние подложки относительно плазменной головки и ее наклон.

Благодаря свойству тепла подниматься вверх (из-за разности давлений разогретого газа) реализация процесса распыления вертикально вверх имеет преимущество по сравнению с режимом, в котором плазменный поток направлен вертикально вниз: тепловой поток от плазмы устремляется в направлении подложки, которая размещается выше плазматрона, и не приводит к нежелательному перегреву коммуникаций плазменного оборудования, что сокращает риск отказа плазматрона. Кроме того, при направлении плазменного потока вверх подложка прогревается лучше.

Представленные рекомендации имеют практическую пользу для потребителей и разработчиков технологического оборудования, применяемого как для процессов нанесения покрытий, так для производства порошков. С помощью компьютерной модели можно прогнозировать результаты ведения процесса и управлять ими, регулируя воздействующие факторы.

Верификация результатов компьютерного эксперимента выполнена путем проведения натурного эксперимента. Результаты сравнительного анализа их итогов показали удовлетворительную сходимость.

Список литературы / References

1. Zhang X., Cocks A., Okajima Y., Takeno K., Torigoe T. An image-based model for the sintering of air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Acta Materialia*. 2021;206:116649. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116649>
2. Miao Y., Zhu H., Gao P., Li L. The effects of spraying power on microstructure, magnetic and dielectric properties

- of plasma sprayed cobalt ferrite coatings. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):14237–14243. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.006>
3. Kim Y., Kim J.H., Han J.-W., Choi J. Multiscale mechanics of yttria film formation during plasma spray coating. *Applied Surface Science*. 2022;572:151416. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151416>
4. Ma Y.-d., Wang X.-y., Wang X.-l., Yang Y., Cui Y.-h., Sun W.-w. In-situ TiC-Ti₅Si₃-SiC composite coatings prepared by plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*. 2020;404:126484. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126484>
5. Umanskii A.P., Terentiev A.E., Brazhevsky V.P. Wear resistance of plasma-sprayed coatings in intensive abrasive wear conditions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020;58:559–566. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00110-3>
6. Wang J., Lu Z., Huang Y., Zhou L., Xing Z., Wang H., Li Z. The mechanism for the enhanced mechanical and piezoelectricity properties of La₂O₃ doped BaTiO₃ ceramic coatings prepared by plasma spray. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;897:162944. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162944>
7. Shi Y., Lu W., Sun W., Zhang S., Yang B., Wang J. Impact of gas pressure on particle feature in Fe-based amorphous alloy powders via gas atomization: Simulation and experiment. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022;105:203–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.075>
8. Sunpreet S., Seeram R., Rupinder S. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;25:185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
9. Oh J.-H., Kim M., Hong S.-H., Lee Y. H., Kim T.-H., Choi S. Facile synthesis of cubic boron nitride nanoparticles from amorphous boron by triple thermal plasma jets at atmospheric pressure. *Advanced Powder Technology*. 2022;33(2):103400. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.103400>
10. Sista K.S., Moon A.P., Sinha G.R., Pirjade B.M., Dwarpudi S. Spherical metal powders through RF plasma spherodization. *Powder Technology*. 2022;400:117225. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117225>
11. Гельчинский Б.Р., Балякин И.А., Юрьев А.А., Ремпель А.А. Высокоэнтропийные сплавы: исследование свойств и перспективы применения в качестве защитных покрытий. *Успехи химии*. 2022;91(6):1–33. Gelchinski B.R., Balyakin I.A., Yuryev A.A., Rempel A.A. High-entropy alloys: properties and prospects of application as protective coatings. *Russian Chemical Reviews*. 2022;91(6):RCR5023. <https://doi.org/10.1070/RCR5023>
12. Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J. Effect of the core-shell structure powders on the microstructure and thermal conduction property of YSZ/Cu composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2021;424:127658. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127658>
13. Golewski P., Sadowski T. Technological and strength aspects of layers made of different powders laminated on a polymer matrix composite substrate. *Molecules*. 2022;27(4):1168. <https://doi.org/10.3390/molecules27041168>
14. Dong X.-Y., Luo X.-T., Zhang S.-L., Li C.-J. A novel strategy for depositing dense self-fluxing alloy coatings with sufficiently bonded splats by one-step atmospheric plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020;29:173–184. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00943-4>
15. Yin Z., Yu D., Zhang Q., Yang S., Yang T. Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization. *Plasma Chem Plasma Process*. 2021;41:1471–1495. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>
16. Cui Y., Zhao Y., Numata H., Yamanaka K., Bian H., Aoyagi K., Chiba A. Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process. *Powder Technology*. 2021;393:301–311. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.062>
17. Alshunaifi I.A., Elaissi S., Ghiloufi I., Alterary S.S., Alharbi A.A. Modelling of a non-transferred plasma torch used for nano-silica powders production. *Applied Sciences*. 2021;11:9842. <https://doi.org/10.3390/app11219842>
18. Khaji M., Peerenboom K., Mullen J., Degrez G. 2D numerical modeling for plasma-assisted CO₂ pooling in supersonic nozzles: importance of a proper nozzle contour design. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021;54(16):165202. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abd355>
19. Ермаков С.Б. Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении. *Вектор науки ТГУ*. 2021;1:7–15. <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-7-15>
Ermakov S.B. Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying. *Vektor nauki TGU*. 2021;1:7–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-7-15>
20. Tailor S., Mohanty R.M., Soni P.R. A review on plasma sprayed Al–SiC composite coatings. *Journal of Materials Science & Surface Engineering*. 2013;1(1):15–22. <https://doi.org/10.jmsse/2348-8956/1-1.5>
21. Keidar M., Beilis I., Boxman R.L., Goldsmith S. 2D expansion of the low-density interelectrode vacuum arc plasma jet in an axial magnetic field. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1996;29:1973. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/7/034>
22. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
23. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Plasma jet stream simulation for formation coating and powder manufacturing processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1954(1):012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012033>
24. Волф У., Герман Б., Ла Рокка Э., Сьюте Г., Тернер Р., Хуфнагел Р. Справочник по инфракрасной технике. М.: Мир, 1995. 606 с.
25. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 215 с.
26. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: Учебное пособие.

Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 88 с.

27. Okulov R.A., Popov E.V., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Development of the computer model of the plasma installation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2064(1): 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012044>

28. Okulov R.A., Sarsadskikh K.I., Ilinykh S.A., Zakharov M.N. Effect of the plasma-forming gas consumption on processes of plasma spray coating and metal powder production. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1281:012058.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012058>

Сведения об авторах



Роман Александрович Окулов – к.т.н., доцент кафедры «Инженерная графика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); ст. науч. сотрудник лаборатории порошковых и композиционных материалов, Институт металлургии Уральского отделения РАН (ИМЕТ УрО РАН).

ORCID: 0000-0003-4488-9190

E-mail: okulov.roman@gmail.com

Сулейман Муллаянович Ахметшин – инженер лаборатории порошковых и композиционных материалов, ИМЕТ УрО РАН.

ORCID: 0009-0000-0814-6790

E-mail: k009893@yandex.ru

Борис Рафаилович Гельчинский – д.ф.-м.н., руководитель отдела материаловедения, ИМЕТ УрО РАН.

ORCID: 0000-0001-5964-5477

E-mail: brg47@list.ru

Андрей Андреевич Ремпель – д.ф.-м.н., академик РАН, директор ИМЕТ УрО РАН.

ORCID: 0000-0002-0543-9982

E-mail: rempel.imet@mail.ru

Information about the Authors

Roman A. Okulov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department “Engineering graphics”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); Senior Researcher of Laboratory of Powder and Composite Materials, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMET UB RAS).

ORCID: 0000-0003-4488-9190

E-mail: okulov.roman@gmail.com

Suleiman M. Akhmetshin – Engineer of Scientific-research, Laboratory of Powder and Composite Materials, IMET UB RAS.

ORCID: 0009-0000-0814-6790

E-mail: k009893@yandex.ru

Boris R. Gelchinsky – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Materials Science, IMET UB RAS.

ORCID: 0000-0001-5964-5477

E-mail: brg47@list.ru

Andrey A. Rempel – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of IMET UB RAS.

ORCID: 0000-0002-0543-9982

E-mail: rempel.imet@mail.ru

Вклад авторов



Р. А. Окулов – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, осуществление расчетов, формулировка выводов.

С. М. Ахметшин – подготовка эксперимента, проведение натурного эксперимента, подготовка текста статьи.

Б. Р. Гельчинский – обеспечение ресурсами, подготовка текста, анализ результатов исследований.

А. А. Ремпель – научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка текста, корректировка выводов.

Contribution of the Authors

R. A. Okulov – Conceptualization, goal and objective definition, manuscript writing, calculations, formulation of conclusions.

S. M. Akhmetshin – Experimental preparation, full-scale experiment conduct, manuscript writing.

B. R. Gelchinsky – Resource provision, manuscript writing, experimental results analysis.

A. A. Pempel – Academic supervision, experimental results analysis, manuscript revision, conclusions revision.

Статья поступила 22.11.2022 г.

Доработана 08.06.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Received 22.11.2022

Revised 08.06.2023

Accepted 09.06.2023