

УДК 621.7:669.056.9

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ТИТАНОВОГО ПОРОШКА В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ¹

©2023 г. Р.А. Окулов^{1*,2*}, В.А. Крашанин^{1*}, Б.Р. Гельчинский^{1*}, А.А. Ремпель^{1*}^{1*}Институт металлургии Уральского отделения РАН (ИМЕТ УрО РАН), Екатеринбург^{2*}Институт фундаментального образования, ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

E-mail: okulov.roman@gmail.com

Поступила в редакцию 29 декабря 2022 г.

После доработки 10 февраля 2023 г. принята к публикации 22 февраля 2023 г.

Представлена попытка определить влияние направления распыления на движение частиц в плазменном потоке с целью оценить влияние силы тяжести. Выбраны три направления распыления: вниз, вверх и горизонтально. Рассматривался титановый порошок ПТМ-1 ТУ 14-22-57-92. Для каждого из рассматриваемых направлений распыления выполнен расчет движения частиц титанового порошка разной дисперсности в плазменном потоке методом конечных элементов с использованием программного пакета SolidWorks. В качестве распыляемого порошкового материала выбраны частицы размерами 1, 50 и 90 мкм. Изучено изменение температуры частиц порошка при движении в плазменном потоке в зависимости от направления распыления. Проведен сравнительный анализ для рассматриваемых направлений распыления, по результатам которого описаны достоинства и недостатки и даны рекомендации по ведению процессов получения порошка и нанесения покрытий. Представленные данные могут быть полезными при выборе положения подложки для нанесения функциональных покрытий. Продемонстрировано влияние силы тяжести на сепарацию получаемых порошков и на распределение температуры плазменного потока в исследуемой зоне. Для верификации результатов расчета проведен натурный эксперимент в плазменной установке, собранной на базе ИМЕТ УрО РАН, которая применяется для получения порошка и нанесения покрытий, с учетом ее конструктивных особенностей. Результаты имеют практическую пользу для разработчиков и потребителей технологического оборудования.

Ключевые слова: направление распыления; сила тяжести; траектория движения частиц; плазменный метод; получение порошков; нанесение покрытий.

Плазменный метод нашел широкое применение для производства порошкового материала, в том числе нанодисперсной фракции [1]. Описание преимуществ и недостатков плазменного метода и предполагаемого развития технологии приведено в обзорной статье [2]. Метод позволяет получать порошки дисперсностью от 20 до 100 мкм из широкого круга металлов, в том числе тугоплавких, нержавеющей сталей, титановых сплавов и др. [3]. Обзор применения плазмотронов в аддитивных технологиях и анализ существующих технологий и конструкций представлен в работе [4].

Также плазменный метод используется для нанесения функциональных покрытий. Например, плазмотроны нашли широкое применение для нанесения защитных покрытий [5]. Плазменное напыление покрытий зарекомендовало себя благодаря ряду преимуществ: высокая интенсивность, непосредственное воздействие источника энергии, локализованная зона воздействия, быстрота, эффективность и производительность [6–9].

Для расчета движения частиц при напылении в производственной практике зарекомендовал себя метод конечных элементов. Известны работы на тему формообразования частиц порошков методом конечных элементов [10]. В работе [11] описано применение численного метода, использованного для определения механизмов роста и влияния

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-21-00063) и в рамках госзадания ИМЕТ УрО РАН (тема № 122020100287-1 ЕГИСУ НИ-ОКТР).

фракции кремния в порошковом материале для двойных систем металл—кремний. В работе [12] рассмотрены особенности конструкции плазмотронов. В работе [13] решалась задача моделирования системы газовой стабилизации плазменной дуги электродуговых плазмотронов прецизионной резки металла. Численный метод применяется для изучения формирования функциональных покрытий из высокоэнтропийных сплавов, например, Gd-Tb-Dy-Ho-Sc и Gd-Tb-Dy-Ho-Y [14].

На свойства нанесенных покрытий и полученных порошков плазменным методом влияют параметры плазменного потока. В свою очередь, параметры плазменного потока зависят от ряда воздействующих факторов, например, от направления распыления. Описание конструкции плазмотронов, в которых плазменный поток ориентирован вертикально вниз, приведено в работах [15—18], данные о плазмотронах с горизонтальным направлением плазменного потока — в работах [19—21]. В литературе значительно меньше статей с описанием конструкции плазмотронов, в которых реализована схема распыления вертикально вверх [22, 23].

Несмотря на то, что в литературных источниках описаны конструкции с разными вариантами направления распыления, есть ряд практически значимых проблем, которые можно считать недостаточно изученными. В частности это относится к роли силы тяжести, проявление которой зависит от направления распыления. Проведение сравнительного анализа движения частиц порошка и определение их параметров, например температуры, в зависимости от направления распыления весьма актуально.

Данная работа выполнена с целью выявления влияния силы тяжести при работе экспериментальной плазменной установки (собрана на базе ИМЕТ УрО РАН в лаборатории порошковых и композиционных материалов, применяется для получения порошка и нанесения функциональных покрытий) для проведения сравнительного анализа и определения температуры частиц при движении в плазменном потоке, ориентированном вверх, вниз и горизонтально. Данное исследование имеет практическую ценность, поскольку позволяет выработать рекомендации, которые могут быть полезны производителям и потребителям технологического обо-

рудования при прогнозировании результатов на стадии проектирования.

Материалы и методика эксперимента. Для решения поставленной задачи использовали метод конечных элементов с последующей верификацией путем проведения натурального эксперимента. При проведении расчета исходными данными служили параметры экспериментальной установки, которая включает плазмотрон, источник питания, узлы водяного охлаждения, подвода плазмообразующего и транспортного газа для ввода порошкового материала, подачи сырья в анодный узел плазменной головки. При проведении эксперимента применен плазмотрон косвенного действия: напряжение 26 В, сила тока 250 А. Более подробное описание лабораторной установки и входящих в ее состав узлов представлено в работе [24].

При подаче порошкового материала в плазменный поток образуется светящийся факел разогретых частиц. В зависимости от материала распыляемого порошка можно наблюдать разный характер свечения факела. Порошок титана характеризуется особенно интенсивным свечением частиц за счет окисления при контакте с воздухом. По этой причине, для наглядности, при проведении натурального эксперимента применен титановый порошок ПТМ-1 (ТУ 14-22-57-92) с насыпной плотностью 1,02 г/см³. Плотность титана составляет 4,5 г/см³. Гранулометрический анализ примененного в эксперименте порошка проведен с помощью анализатора размеров CAMSIZER-XT (Германия). Анализ показал, что на 90% порошок состоит из частиц <91 мкм, 50% частиц порошка имеет размер <50 мкм. Фракции порошка имели разброс частиц по крупности в диапазоне от 1 до 106 мкм.

Для определения влияния силы тяжести на параметры плазменного потока, движение частиц распыляемого порошка в нем и их температуру проведено сравнение процессов распыления в трех характерных направлениях плазменного потока: вниз (действие силы тяжести по направлению плазменного потока), вверх (действие силы тяжести в направлении, противоположном плазменному потоку) и горизонтально (действие силы тяжести в направлении, перпендикулярном плазменному потоку). Рассматривались длина и ширина поперечного сечения факела светящихся частиц, расположенного в плос-

кости, лежащей вдоль оси плазменного потока. Исследовано влияние силы тяжести на распределение теплового поля и на сепарацию разных фракций распыляемого порошка при направлении плазменного потока вверх.

В качестве программного пакета, реализующего метод конечных элементов, использован SolidWorks. При проведении расчета размер частиц выбран по результатам проведенного гранулометрического анализа порошка в натурном эксперименте. Выбраны частицы размерами 1, 50 и 90 мкм. Программный пакет позволяет исследовать движение в плазменном потоке частиц порошка как отдельно для каждой из выбранных фракций, так и одновременно для всех трех. Для каждой из рассматриваемых фракций расчет проведен для 100 частиц.

Принято, что температура, при которой происходит свечение титанового порошка и видны яркие искры, выше 1573 К. При определении температур руководствовались справочными данными о цветах калия титана (ярко-красный — 900 °С, желтый — 1200 °С, белый — 1300 °С) [25].

В качестве плазмообразующего газа использован аргон чистотой 99,993% (ГОСТ 10157—2016). Использовали объемный расход плазмообразующего газа 7 л/мин, массовый расход порошкового материала 1 г/с.

Для каждого из рассматриваемых случаев направления плазменного потока проведены пять параллельных экспериментов. С целью получения надежных результатов при замерах провели статистическую обработку итогов эксперимента. В качестве наиболее подходящего метода статистического анализа выбран метод точечных диаграмм размахов и их средних значений [26, 27].

Для дополнительной верификации результатов расчета провели натурный эксперимент. Целью дополнительного натурального эксперимента являлось определение температуры плазменного потока на его оси при холостом функционировании установки (без распыления порошка) и сравнение ее значения с данными, полученными в результате расчета. Температуру плазменного потока определяли путем поочередного расположения по его оси прутков. Для этого выбраны три набора прутков диаметром 3 мм с заведомо известной температурой плавления:

медь М1 (ГОСТ 859—2014), сталь 10 (ГОСТ 1050—2013) и вольфрам лантанированный (ТУ 48-19-27-88). Каждый из трех наборов прутков состоял из пяти образцов одинакового материала, чтобы была возможность проведения пяти параллельных экспериментов. Для учета теплообменных процессов (теплопроводность и излучение) при проведении натурального эксперимента определяли фактическую температуру на поверхности прутков в момент начала плавления с помощью оптического пирометра ЭОП-66 № 240 (ГОСТ 5.278). Прутки поочередно располагали по оси плазменного потока таким образом, чтобы один конец прутка был зафиксирован в зажиме, а другой (свободный) конец прутка был направлен в сторону плазмотрона и располагался от него на расстоянии 0,5 м. Оптический пирометр был направлен на свободный конец прутка, чтобы фиксировать температуру на его поверхности. 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. В момент, когда на поверхности прутка начинался процесс плавления, фиксировали расстояние от прутка до плазмотрона и фактическую температуру поверхности прутка. Полученные в результате натурального эксперимента данные показали, что плавление каждого из прутков начинается при температуре, соответствующей справочным данным для каждого материала прутка (незначительное отклонение не превышало 22 К). Подробное описание натурального эксперимента представлено в работах [28—30], а результаты приведены в табл. 1. Сравнительный анализ итогов расчета и натурального эксперимента показал, что их расхождение не превышает 5%.

Результаты исследования и их обсуждение. Для каждого из рассматриваемых случаев направления плазменного потока усредненные данные натурального эксперимента (по результатам пяти параллельных опытов) и итоги расчета для трех фракций представлены в табл. 2.

Как видно из представленных данных, направление плазменного потока оказывает существенное влияние на движение частиц в нем и на их температуру, что подтвержда-

Таблица 1

**Расстояние L по оси плазменного потока от среза сопла
плазмотрона до положения прутка,
при котором начинается плавление на поверхности**

Материал	Расстояние L , мм		Отклонение, %
	по расчету	в натурном эксперименте	
Медь М1	141	135	4,4
Сталь 10	82	85	3,5
Лантанированный вольфрам	19	20	5,0

Таблица 2

**Размеры факела светящегося порошка в плазменном потоке
(l — длина факела; b — его ширина)**

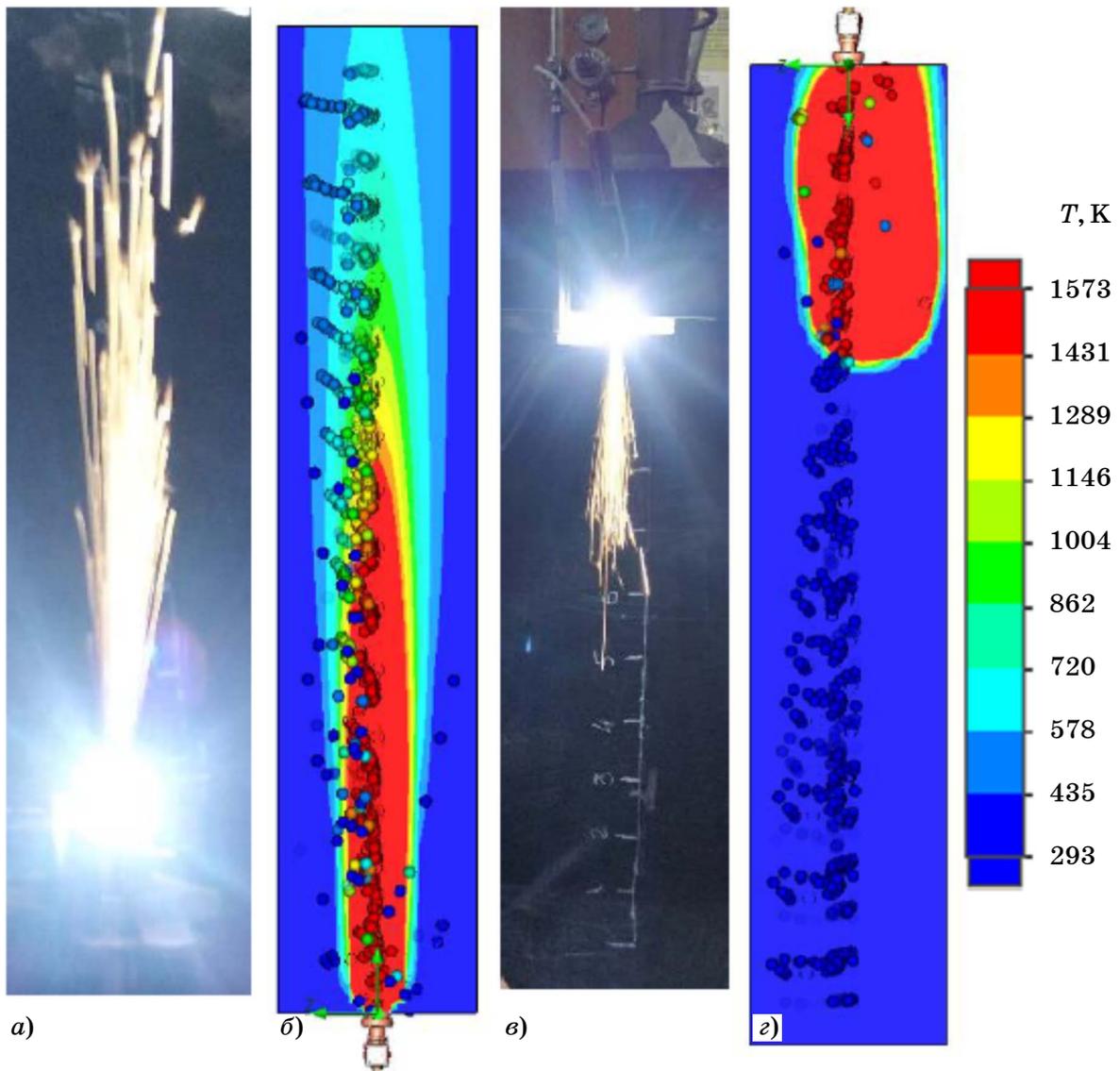
Направление распыления	Натурный эксперимент		Расчет для фракции, мкм					
			1		50		90	
	l , мм	b , мм	l , мм	b , мм	l , мм	b , мм	l , мм	b , мм
Вверх	750	110	712	96	762	105	802	115
Горизонтально	250	60	199	52	212	55	248	57
Вниз	350	150	301	119	321	138	345	146

ет важность выбора направления плазменного потока в процессах нанесения покрытий и получения порошка. По итогам выполненного расчета получены картины распределения температуры плазменного потока в плоскости, расположенной в сечении вдоль оси потока, а также определены траектории частиц порошка с указанием их температуры для каждого из рассматриваемых направлений. Данные проведенного расчета на фигурах $a—e$ соотнесены с результатами натурального эксперимента. Размер частиц в расчетах показан условно. Результаты расчета согласуются с данными, полученными при проведении натурального эксперимента.

Видно, что области с температурой >1573 К имеют разную форму, их длина и ширина в рассматриваемых случаях зависят от выбора направлений распыления. При направлении потока вверх наблюдается наибольшая длина факела со светящейся фракцией порошка. Это объясняется тем, что при повышении температуры газа его давление понижается, газ перемещается вверх относительно слоев с более низким давлением. Таким

образом проявляется сила тяжести, воздействуя на распределение температуры. Частицы порошка находятся в данной области в течение большего времени по сравнению с другими вариантами распыления и прогреваются лучше, что положительно влияет на их сфероидизацию. Этот эффект является достоинством варианта распыления вверх по сравнению с другими рассмотренными направлениями распыления. Представленные данные согласуются с описанными в литературе [31].

При направлении плазменного потока вверх происходит естественная сепарация распыляемого порошка по фракциям: радиус разброса частиц более мелкой фракции наибольший, тогда как частицы более крупной фракции распределяются ближе к оси плазменного потока. Это объясняется тем, что частицы порошка меньшего размера, обладая меньшей массой, увлекаются потоком легче, чем более крупные частицы. Расчетом получены значения радиусов разбросов частиц разных фракций. Частицы размером 1 мкм оседали на расстоянии от оси плазменного



a)

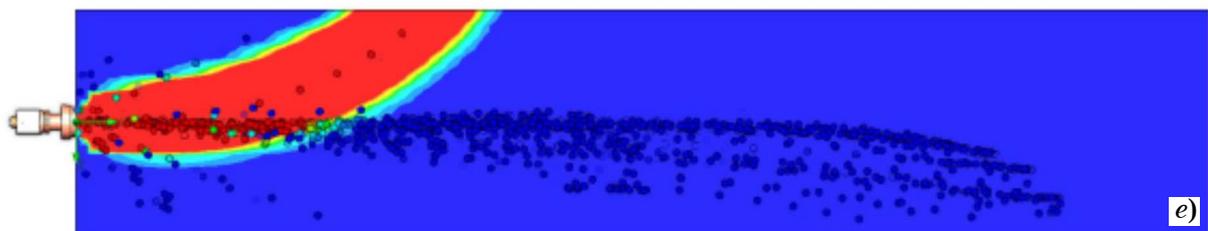
б)

в)

г)



д)



е)

Итоги натурального эксперимента (а, в, д) и проведенного расчета (б, г, е) для направлений распыления: вверх (а, б); вниз (в, г) и горизонтально (д, е)

потока, не превышающем 1,6 м, а частицы размером 90 мкм — на расстоянии, не превышающем 0,9 м. Представленные данные согласуются с приведенными в литературе [32]. Описанный эффект естественной сепарации частиц можно использовать для совершенствования технологического оборудования, например конструкции камеры приема порошкового материала. Предлагается в камере приема порошка предусмотреть бункеры, расположенные на разном удалении от оси плазменного потока, что позволит собирать получаемый порошок разных фракций, устранить сложности, возникающие при использовании циклонов [33] или конструкции плазменных установок с двумя параллельными камерами [34].

При проведении натурного эксперимента с распылением вверх не был выполнен детальный анализ распределения распыляемого порошка в зависимости от его размера, тем не менее невооруженным глазом можно было наблюдать, что частицы с меньшим размером оседали на более значительном расстоянии от оси плазменного потока, чем более крупные частицы.

При получении порошка в камере с водоохлаждаемыми стенками и реализацией направления распыления вниз верхняя часть камеры нагревалась более интенсивно, чем нижняя, по сравнению с процессом распыления вверх, при котором происходит более равномерное нагревание по всей поверхности камеры. При недостаточно эффективном охлаждении можно предположить ограничение времени непрерывного функционирования установки с направлением распыления вниз из-за возможного отказа оборудования вследствие прогорания стенки камеры. В этом преимущество варианта распыления с направлением вверх. При реализации процесса получения порошка с горизонтальным распылением из-за свойства теплоты распространяться вверх нагрев камеры приема порошка также неравномерный.

Представленные данные полезны при выборе места положения подложки, на которую наносится покрытие, и позволяют учитывать форму плазменного потока при определении положения подложки относительно его, особенность движения частиц распыляемого порошка в потоке, нагрев подложки в зависимости от удаления от плазмотрона. Среди достоинств распыления вверх важно

отметить, что данное направление не ведет к нежелательному нагреванию плазмотрона и коммуникаций в отличие от случая распыления с направлением вниз. Данное преимущество подчеркнуто в статье [35], в которой для решения проблемы перегрева предлагается конструкция плазмотрона, обеспечивающая направление плазменного потока под углом 45° к горизонту.

Практика эксплуатации лабораторной экспериментальной плазменной установки при нанесении покрытий показала, что при реализации распыления вниз из-за свойства теплоты распространяться вверх плазменная головка и коммуникации нагреваются более интенсивно, приводя к снижению эффективности охлаждения и сокращению длительности непрерывной работы до наступления отказа из-за прогорания стенки анода. Определили время непрерывной работы для рассмотренных вариантов направления распыления до наступления отказа. При направлении плазменного потока вверх лабораторная установка может функционировать не более 30 мин, а при направлении вниз — не более 10 мин. Ограничение во времени непрерывного функционирования лабораторной установки связано с ее конструктивными особенностями (например, потому что подводящие коммуникации расположены в непосредственной близости к плазменной головке и находятся сверху). Сопутствующее нагревание воды в подводящих трубках системы водного охлаждения снижает эффективность теплосъема.

Выводы. 1. Практическая значимость проведенного исследования состоит в разработке рекомендаций для процессов производства порошка и нанесения покрытий при совершенствовании технологического оборудования, в том числе на стадии проектирования. Предлагается для прогнозирования результатов использовать описанный расчет.

2. Для процесса производства порошка рекомендуется применять вариант конфигурации установки с распылением, направленным вверх, поскольку у данного варианта самая длинная область плазменного потока с высокой температурой по сравнению с остальными направлениями распыления. Благодаря форме плазменного потока частицы порошка дольше находятся в зоне высокой температуры, что позитивно сказывается на процессе сфероидизации. При совершенство-

вании конструкции камеры приема порошка следует учесть естественную сепарацию и предусмотреть узел, позволяющий сортировать получаемый порошок. Направленный вверх плазменный поток обеспечивает достижение более равномерного распределения нагревания поверхности камеры приема порошка, позволяя предотвратить нежелательный перегрев и прогорание стенок камеры в случае неэффективного охлаждения, увеличивая длительность непрерывного функционирования.

3. При нанесении покрытий с реализацией направления распыления вверх предотвращается нежелательный перегрев плазмотрона, отсутствует воздействие температуры на коммуникации, подводимые к плазменной головке, что позволяет предотвратить отказ оборудования.

4. Полученные данные можно использовать для определения оптимального положения подложки, на которую наносится покрытие (учесть параметры распределения температуры в потоке, определить рациональное положение подложки относительно плазмотрона, ее прогрев). Представленные результаты согласуются с описанными в литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноздрин, И.В. Разработка научных основ и технологий плазмометаллургического производства нанопорошков борида и карбида хрома : дис. ... докт. техн. наук : 05.16.06 / Ноздрин Игорь Васильевич ; Сиб. федер. ун-т. — Красноярск, 2015. 323 с.
2. Sneha, S. Thermal plasma technology : the prospective future in material processing / S. Sneha // J. Cleaner Production. 2017. V.142. №4. P.3131—3150.
3. Струков, Н.Н. Разработка технологии плазменного распыления прутковых материалов в камере с противотоком : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10 / Струков Николай Николаевич ; Пермский нац. исследоват. политех. ун-т. Пермь, 2012. 126 с.
4. Sunpreet, S. Material issues in additive manufacturing : a review / S. Sunpreet, R. Seeram, S. Rupinder // J. Manufact. Proc. 2017. V.25. P.185—200.
5. Фролов, В.А. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) / В.А. Фролов, В.А. Поклад, Б.В. Рябенко, Д.В. Викторенков // Сварочное производство. 2006. №11. С.38—47.
6. Денисова, Ю.А. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Ю.А. Денисова, Ю.Ф. Иванов, О.В. Иванова [и др.]. — Томск : Изд-во научно-технической литературы, 2016. 303 с.
7. Neikov, O. Non-ferrous powder production : manufacturing methods and properties of copper, aluminium, titanium and nickel powders / O. Neikov // Powder Metallurgy Review. 2014. Summer. P.65—87.
8. Leyens, C. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / C. Leyens, M. Peters. — Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 513 p.
9. Anakhov, S.V. Gas vortex stabilization in plasma torches : new solutions / S.V. Anakhov, Yu.A. Pykin, A.V. Matushkin // Welding International. 2016. V.30. Is.5. P.408—412.
10. Bora, B. Numerical investigation of nanoparticle synthesis in supersonic thermal plasma expansion / B. Bora, B.J. Saikia, C. Borgohain, M. Kakati, A.K. Das // Vacuum. 2010. V.85. Is.2. P.283—289.
11. Masaya, S. Effect of precursor fraction on silicide nanopowder growth under thermal plasma conditions : a computational study / S. Masaya, W. Takayuki // Powder Technology. 2016. V.288. P.191—201.
12. Клименко, А.А. Конструкции электродуговых плазмотронов / А.А. Клименко, Г.К. Ляпин. — М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2010. 56 с.
13. Матушкин, А.В. Совершенствование системы газовой вихревой стабилизации электродуговых плазмотронов для резки металлов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10 / Матушкин Анатолий Владимирович ; Ур. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. — Екатеринбург, 2017. 132 с.
14. Gelchinski, B.R. High-entropy alloys : properties and prospects of application as protective coatings / B.R. Gelchinski, I.A. Balyakin, A.A. Yuryev, A.A. Rempel // Russian Chemical Rev. 2022. V.91. Is.6. Art.RCR5023.
15. Hong, F. Synthesis and characterization of silicon oxide nanoparticles using an atmospheric DC plasma torch / F. Chau-Nan Hong, C.-J. Yan // Advanced Powder Technol. 2018. V.29. P.220—229.
16. He, J. Simulation and experimental observation of silicon particles vaporization in RF thermal plasma reactor for preparing Si nano-powder / J. He, L. Bai, H. Jin, Z. Jia, G. Hou, F. Yuan // Powder Technology. 2017. V.313. P.27—35.
17. Quesnel, F. Nanowires and nanostructures of lithium titanate synthesized in a continuous thermal plasma reactor / F. Quesnel, G. Soucy, J. Veilleux, P. Hovington, W. Zhu, K. Zaghbi // Chem. Eng. J. 2016. V.306. P.640—645.
18. Hou, H. Spheroidizing mechanisms and simulation of spherical silica in oxygen-acetylene flame / H. Hou, Z. Ji, Z. Xie, H. Jin // Advanced Powder Technol. 2018. V.29. P.789—795.
19. Anupam, A. Understanding the microstructural evolution of high entropy alloy coatings manufactured by atmospheric plasma spray processing / A. Anupam, R.S. Kottada, S. Kashyap, A. Meghwal, B.S. Murty, C.C. Berndt, A.S.M. Ang // Applied Surface Science. 2020. V.505. Art.144117.
20. Dalir, E. Modeling of suspension plasma spraying process including arc movement inside the torch / E. Dalir, A. Dolatabadi, J. Mostaghimi // J. Thermal Spray Technol. 2019. V.28. P.1105—1125.
21. Subbiah, R. Experimental study of wear behaviour on Al-2014 alloy coated with thermal spray HVOF (high velocity oxy-fuel) and plasma spray process : a review / R. Subbiah, A. Arun, A. A. Lakshmi, A.N.S. Harika, N. Ram, N. Sateesh // Materials Today : Proceedings. 2019. V.18. P.5151—5157.
22. Li, S.Q. Flame aerosol synthesis of nanostructured materials and functional devices: Processing, mode-

- ling, and diagnostics / S.Q. Li, Y. Ren, P. Biswas, S.D. Tse // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016. V.55. P.1—59.
23. *Torabmostaedi, H.* Process control for the synthesis of ZrO₂ nanoparticles using FSP at high production rate / H. Torabmostaedi, T. Zhang, P. Foot, S. Dembele, C. Fernandez // *Powder Technology*. 2013. V.246. P.419—433.
 24. *Okulov, R.A.* Influence of the plasmatron anode length in the processes of powder production and coating / R.A. Okulov, V.A. Krashaninin, E.V. Popov // *AIP Conf. Proceed.* 2022. V.2456. Art.020035.
 25. *Волф, У.* Справочник по инфракрасной технике / У. Волф, Б. Герман, Э. Ла Рокка, Г. Сьюте, Р. Тернер. Р. Хуфнагел. — М. : Мир, 1995. 606 с.
 26. *Солонин, И.С.* Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. — М. : Машиностроение, 1972. 215 с.
 27. *Кравченко, Н.С.* Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме : учеб. пособие / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. — Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. 88 с.
 28. *Okulov, R.A.* Effect of the plasma-forming gas consumption on processes of plasma spray coating and metal powder production / R.A. Okulov, K.I. Sarsadskikh, S.A. Plinykh, M.N. Zakharov // *J. Physics : Conf. Ser.* 2019. V.1281. Art.012058.
 29. *Okulov, R.A.* Development of the computer model of the plasma installation / R.A. Okulov, E.V. Popov, B.R. Gelchinsky, A.A. Rempel // *J. Physics : Conf. Ser.* 2021. V.2064. Art.012044.
 30. *Okulov, R.A.* Plasma jet stream simulation for formation coating and powder manufacturing processes / R.A. Okulov, V.A. Krashaninin, E.V. Popov // *J. Physics : Conf. Ser.* 2021. V.1954. Art.012033.
 31. *Madler, L.* Controlled synthesis of nanostructured particles by flame spray pyrolysis / L. Madler, H.K. Kammler, R. Mueller, S.E. Pratsinis // *Aerosol Science*. 2002. V.33. P.369—389.
 32. *He, J.* Optimization of tungsten particles spheroidization with different size in thermal plasma reactor based on numerical simulation / J. He, L. Bai, H. Jin, F. Yuan // *Powder Technology*. 2016. V. 302. P.288—297.
 33. *Neikov, O.D.* Nanopowders / O.D. Neikov, N.A. Yefimov // *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*. — [S.l.] : Elsevier, 2019. Chapter 9. P.271—311.
 34. *Zhu, H.* Study on behaviors of tungsten powders in radio frequency thermal plasma / H. Zhu, H. Tong, C. Cheng, N. Liu // *Intern. J. Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. V.66. P.76—82.
 35. *Chazelas, C.* Synthesis of nanometer alumina particles by plasma transferred arc alternative / C. Chazelas, J.F. Coudert, J. Jarrige, P. Fauchais // *J. European Ceramic Soc.* 2007. V.27. P.947—950.