

И. П. Гуляев, В. И. Кузьмин, М. П. Голубев, П. А. Тырышкин, А. В. Долматов

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ НАПЫЛИТЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА
«ПНК-50» ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ**

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Междисциплинарные интеграционные исследования» Сибирского отделения РАН № 0323-2018-0026 и программы «Ведущая научная школа» Югорского государственного университета № 13-01-20/28.

В работе представлены исследования газодинамической структуры воздушных плазменных потоков, формируемых напылительным плазмоторном «ПНК-50», с помощью теневое (илирен) метода. Изучена работа плазмоторна в трех различных конфигурациях, отличающихся, кроме прочего, диаметром выходного сечения канала: 6, 8, 10 мм. Исследованы дозвуковые и сверхзвуковые режимы работы плазмоторна в диапазоне расхода плазмообразующего воздуха 1.4–10.5 г/с и в диапазоне токов дуги 140–230 А. Во всех типичных режимах работы плазмоторна поток имеет развитую турбулентную структуру с полным углом раскрытия струи 23–27 градусов. Дополнительный режим работы плазмоторна с выходным диаметром сопла 14 мм позволил реализовать ламинарный режим течения. Установлено, что ламинарно-турбулентный переход наблюдается в диапазоне чисел Рейнольдса 400–900. Визуализирована картина натекания сверхзвукового потока на плоскую преграду – подложку для напыления, расположенную на дистанции 85 мм от среза сопла плазмоторна.

Ключевые слова: плазменное напыление, теневой метод, илирен, низкотемпературная плазма, струя, поток, турбулентность.

I. P. Gulyaev, V. I. Kuzmin, M. P. Golubev, P. A. Tyryshkin, A. V. Dolmatov

**VISUALIZATION OF THE GAS-DYNAMIC STRUCTURE OF PLASMA FLOWS
OF A PNK-50 PLASMA TORCH USING THE SHADOW METHOD**

The paper presents the study of the gas-dynamic structure of air plasma flows produced by the PNK-50 spray torch using the shadow (schlieren) method. The operation of the plasma torch was studied in three different configurations, differing, among other things, by the diameter of the output section of the channel: 6, 8, 10 mm. The subsonic and supersonic modes of operation of the plasma torch were investigated in the range of plasma-forming air flow 1.4–10.5 g / s and arc current range 140–230 A. In all typical modes of operation of the plasma torch, the flow has a developed turbulent structure with a full angle of jet opening between 23 and 27 degrees. An additional mode of operation of the plasma torch with an output nozzle diameter of 14 mm allowed the realization of a laminar flow regime. It is established that the laminar-turbulent transition is observed in the range of Reynolds numbers 400 – 900. The pattern of supersonic flow impinging a flat barrier – a substrate for placed at a distance of 85 mm from the plasma torch, is visualized.

Key words: plasma spraying, shadow method, schlieren, low-temperature plasma, jet, flow, turbulence.

Введение

Развитие методов газотермического напыления (ГТН) в последнее десятилетие связано с увеличением скоростей напыляемых частиц с целью повышения таких характеристик покрытий, как плотность, твердость, адгезионная прочность, коррозионная стойкость и т. д. Ориентирами в этой области являются методы высокоскоростного газопламенного (HVOF, HVAF) и детонационного напыления, в которых газовые потоки со скоростью 2–2,5 км/с обеспечивают ускорение частиц материала до 500–800 м/с и выше [1]. Однако успехи разработки сверхзвуковых атмосферных плазмотронов в последние годы [2–4] демонстрируют, что плазменное напыление способно обеспечить сопоставимые параметры частиц дисперсной фазы и качество покрытий. Кроме того, в последние годы получила мощнейшее развитие технология плазменного напыления суспензий и жидких прекурсоров (SPS и LPPS) [5], в которой для формирования покрытий из частиц малого размера (0,1–5 мкм) требуется повышение их скорости до 500 м/с и выше. В частности, метод SPS может применяться для нанесения газоплотных слоев электролитов на планарные и трубчатые элементы твердооксидных топливных элементов [6].

В Институте теоретической и прикладной механики СО РАН в 2016–2018 годах был создан сверхзвуковой вариант напылительного плазмотрона «ПНК-50» [7, 8], позволивший достигнуть средних значений скорости напыляемых частиц 600–800 м/с, которые сравнимы с показателями наиболее высокоскоростных методов ГТН. В ходе разработки нового оборудования и технологических режимов напыления важнейшее значение имели не только исследования параметров напыляемых частиц [9–11] и качества получаемых покрытий [12, 13], но и анализ газодинамической структуры плазменных потоков в различных режимах работы плазмотрона.

Целью работы является исследование газодинамической структуры воздушных плазменных потоков теневым (шлирен) методом, выполнявшееся в ходе разработки новой конфигурации плазмотрона «Сверхзвук». Экспериментальные результаты могут быть использованы для верификации аналитических и численных моделей газодинамики и межфазного переноса дисперсных плазменных потоков.

Оборудование и методика эксперимента

Эксперименты проводились на лабораторном стенде ИТПМ СО РАН, оснащенный электродуговым плазмотроном «ПНК-50», входящем в состав напылительной установки серии «Термоплазма 50» и приведенным на рисунке 1. Плазмотрон выполнен по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой и рассчитан на работу в дозвуковом и сверхзвуковом режимах истечения плазменных струй.

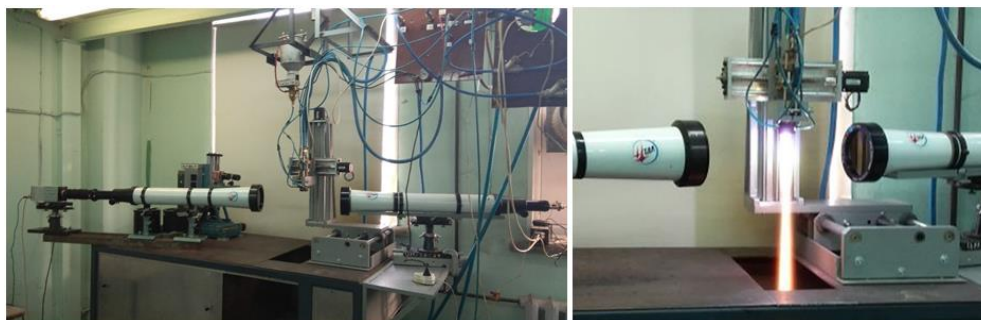


Рисунок 1 – Внешний вид экспериментальной установки

В работе были использованы три конфигурации плазмотрона «ПНК-50», отличающиеся длиной межэлектродного расстояния и геометрией выходного сопла. Конфигурация «Керамика» (выходной диаметр сопла 10 мм) обеспечивает наиболее низкую скорость и высокую температуру плазмы и предназначена для напыления самых тугоплавких материалов. Конфигурация «Металл» (диаметр сопла 8 мм) обеспечивает более высокую скорость потока и предназначена для напыления металлических покрытий. Конфигурация «Сверхзвук» (выходной канал в виде сопла Лавала с диаметром критического сечения 6 мм) создана с целью обеспечения параметров потока, близких к технологии HVOF (2000–2400 м/с, 2500–2800 К). Была исследована работа плазмотрона при значениях полного расхода газа в диапазоне 1,4–10,5 г/с и тока дуги в диапазоне 140–230 А. Рабочий газ во всех случаях был воздух с добавкой 5–8 % метана для защиты анода.

Таблица – Основные параметры плазменных потоков

Расход пл. газа, г/с	Ток / напряж. дуги, А	Температура потока, К	Скорость потока, м/с	Число Рейнольдса
Конфигурация «Керамика» (d=10 мм)				
1.40	140/218	6000	400	950
1.75	200/230	6400	570	1150
2.63	200/250	5700	690	1900
4.29	200/290	4700	870	3700
Конфигурация «Металл» (d=8 мм)				
2.63	200/192	5000	900	2650
3.50	200/223	4400	1050	4000
4.38	200/238	4000	1150	5400
5.25	200/250	3700	1200	7050
Конфигурация «Сверхзвук» (d=6 мм)				
5.25	200/227	3600	2080	9700
7.88	200/272	3200	2220	13800
10.50	200/310	2800	2380	17300

Для визуализации газодинамической структуры потоков был использован теньвой прибор ТП-АВТ-1 (ИТПМ СО РАН) [14, 15]. Для увеличения чувствительности диагностической системы (возможности регистрировать малые изменения плотности потока на фоне более сильных возмущений) в приборе вместо традиционного ножа Фуко используется адаптивный визуализирующий транспарант (АВТ) [16, 18]. В качестве источника зондирующего излучения использовался лазер КЛМ-А532-5-5 («ФТИ-Оптроник») с длиной волны 532 нм [19]. Регистрация теньвых изображений осуществлялась с помощью видеокамеры Sensicam (PCO AG, Германия) с временем экспозиции кадра 1-1.875 мкс по известной методике [21].

Для каждого режима работы плазмотрона по методике [17, 20] были рассчитаны значения среднемассовой температуры и скорости потока, а также числа Рейнольдса, определенному по выходному диаметру сопла. В таблице представлены результаты оценки параметров потока для различных расходов газа при токе 200 А. Значения скорости и температуры потока округлены с точностью до десятков и сотен соответственно.

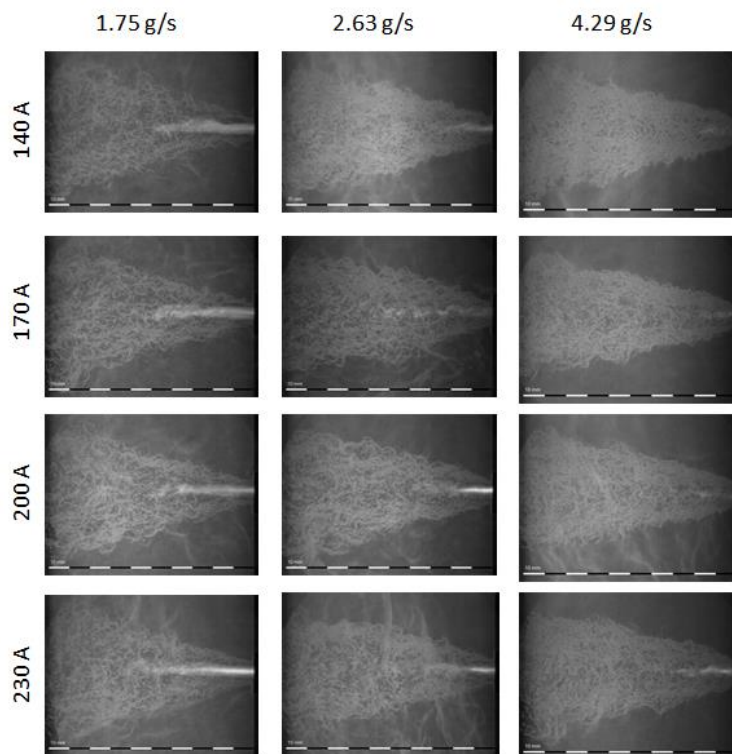


Рисунок 2 – Теньвые изображения плазменных потоков, формируемых плазмотроном в конфигурации «Керамика» (диаметр сопла 10 мм)

Результаты диагностики

На рисунках 2–4 показаны характерные теньевые изображения плазменных потоков, соответствующих изученным режимам работы плазмотрона. Как можно видеть, даже в случае сборки «Керамика» при использовании минимального расхода газа плазменный поток имеет развитую турбулентную структуру (рисунок 2). Угол раскрытия струи составляет 23–27 градусов.

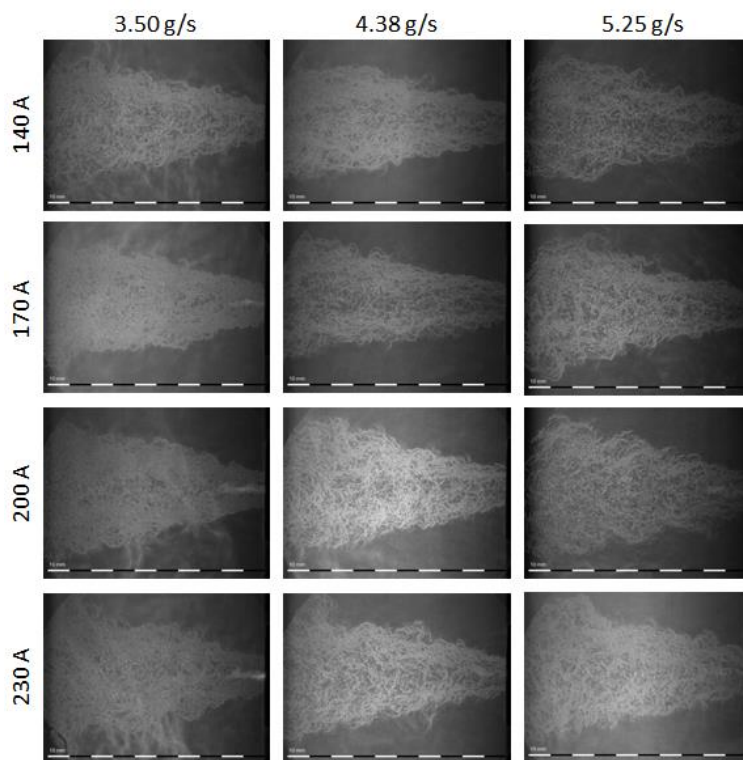


Рисунок 3 – Теньевые изображения плазменных потоков, формируемых плазмотроном в конфигурации «Металл» (диаметр сопла 8 мм)

В режимах с наиболее высоким значением среднemasсовой температуры газа (низкий расход газа, высокий ток дуги) можно наблюдать ядро струи, выходящее на расстояние 20–50 мм от среза сопла. Именно высокая температура на уровне 5000–7000 К обуславливает интенсивное собственное излучение ядра в непрерывном и полосатом спектре.

Сравнение изображений на рисунках 2–4 показывает, что повышение скорости истечения плазменного потока (и числа Рейнольдса) приводит к снижению характерного размера неоднородностей турбулентной структуры струи. Эти неоднородности связаны с градиентами плотности газа, возникающими при перемешивании «горячего» потока с «холодной» окружающей атмосферой.

Можно заметить, что на снимках рисунка 4 не видна волновая структура скачков уплотнения – дисков Маха, характерная для сверхзвуковых струй, истекающих в нерасчетном режиме, т. е. при отличии давления в выходном сечении сверхзвукового сопла от давления окружающей атмосферы. При этом упомянутые скачки отчетливо видны на обычных фотоснимках сверхзвуковой плазменной струи [7].

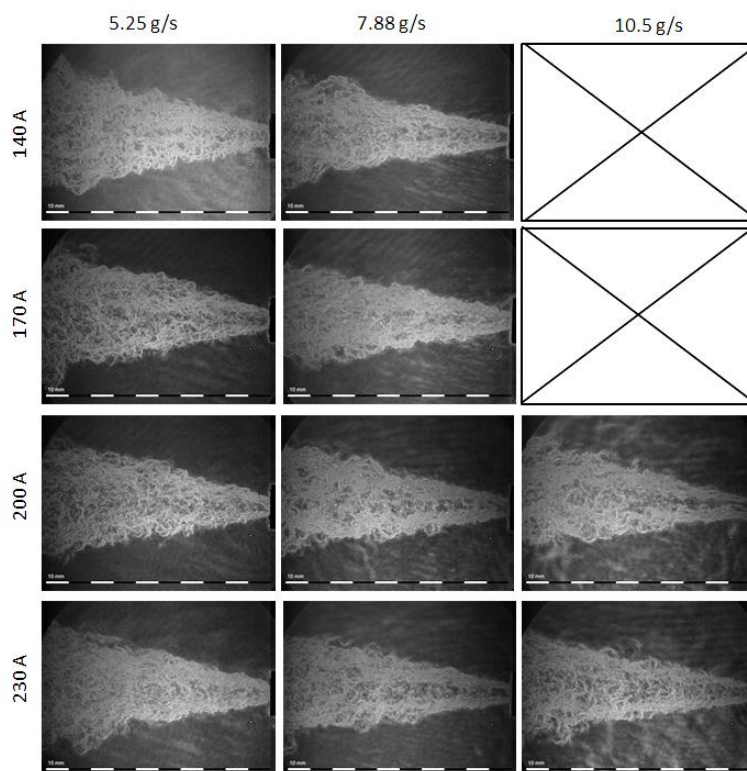


Рисунок 4 – Теневые изображения плазменных потоков, формируемых плазматроном в конфигурации «Сверхзвук» (диаметр сопла 6 мм)

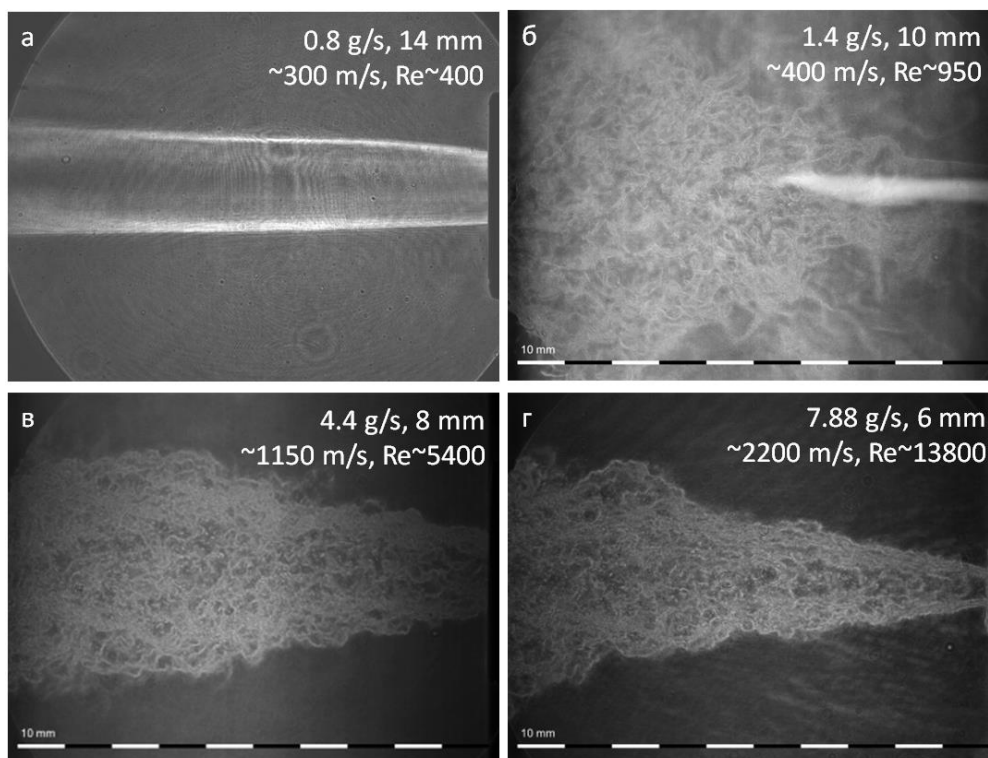


Рисунок 5 – Зависимость структуры воздушного плазменного потока от числа Рейнольдса: а) ламинарный, б) переходной, в-г) турбулентный

Из теневых картин на рисунках 2–4 видно, что режим истечения плазменных струй во всех типичных режимах напыления плазматрона «ПНК-50» является турбулентным. Для реализации ламинарного режима необходимо снизить скорость (расход) газа и/или увеличить выходной диаметр сопла. На Рисунке 5 показано изменение структуры плазменного потока при по-

следовательном повышении числа Рейнольдса с 400 до 13800. Как можно видеть, ламинарно-турбулентный переход происходит ориентировочно в диапазоне $Re=400-900$. При $Re=950$ ламинарный участок струи имеет длину около 25 мм, далее происходит турбулизация потока.

Взаимодействие высокоскоростной турбулентной плазменной струи с плоской преградой представляет отдельный интерес в контексте технологии плазменного напыления покрытий. На Рисунке 6 показаны картины натекания сверхзвукового потока (сопло 6 мм, 10,5 г/с, 230 А) на плоские круглые подложки диаметром 25 мм, расположенные на расстоянии 85 мм от сопла плазматрона под углами 90–120 градусов. Такая геометрия соответствует типичным условиям напыления в технологиях SPS и LPPS. На представленных снимках виден пограничный слой, формируемый вблизи поверхности подложки: область, в которой масштаб турбулентных неоднородностей заметно ниже, чем в основном объеме плазменной струи. Толщина пограничного слоя составляет около 6 мм.

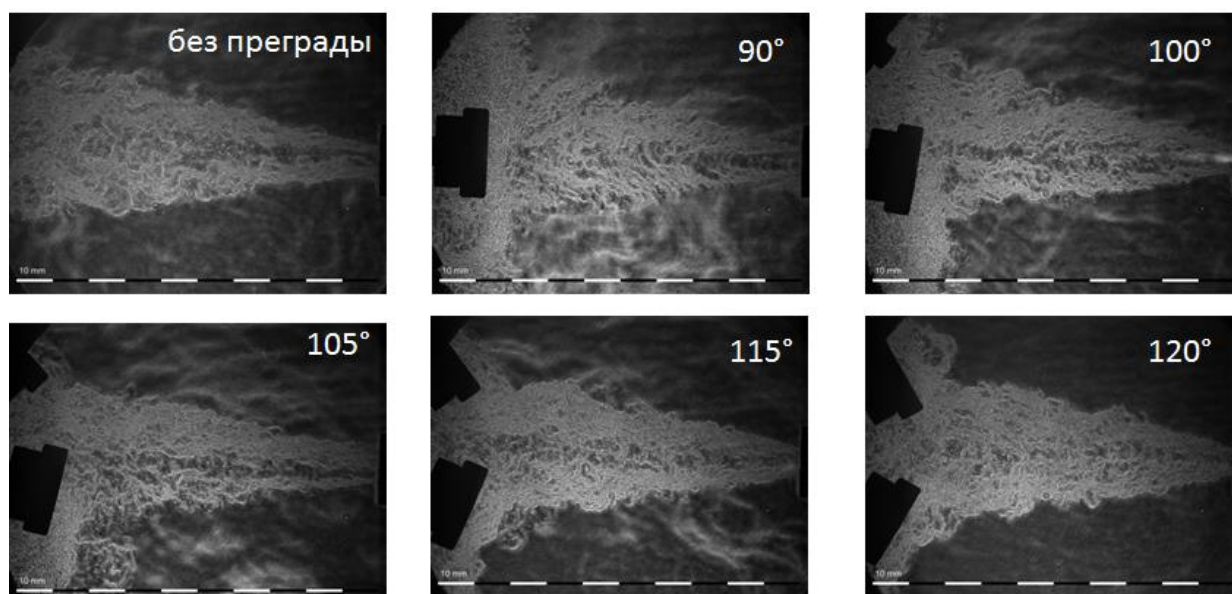


Рисунок 6 – Теневая визуализация натекания плазменного потока на преграды (подложки), расположенные под различными углами к оси потока

Выводы

Проведенные исследования позволили получить экспериментальные данные о газодинамической структуре плазменных потоков, формируемых плазматроном «ПНК-50» в трех различных конфигурациях, отличающихся, кроме прочего, диаметром выходного сечения канала: 6, 8, 10 мм. Исследованы дозвуковые и сверхзвуковые режимы работы плазматрона в диапазоне расхода плазмообразующего воздуха 1,4–10,5 г/с и в диапазоне токов 140–230 А. Во всех типичных режимах работы плазматрона поток имеет развитую турбулентную структуру с полным углом раскрытия струи 23–27 градусов. Дополнительный режим работы плазматрона с выходным диаметром сопла 14 мм позволил реализовать ламинарный характер течения. Установлено, что ламинарно-турбулентный переход наблюдается в диапазоне чисел Рейнольдса 400–900. Толщина пограничного слоя на поверхности плоской преграды (подложки для напыления), расположенной на расстоянии 85 мм от среза сопла плазматрона, составляет 6 мм.

Литература

1. Fauchais, P. L. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part [Text] / P. Fauchais, J. V. R. Heberlein, M. I. Boulos. – New York : Springer, 2014. – 1566 p.
2. Effect of Processing Parameters on Plasma Jet and In-flight Particles Characters in Supersonic Plasma Spraying [Text] / P. Wei [et al.] // High Temperature Materials and Processes. – 2015. – Vol. 35, iss. 8. – P. 775–786.
3. Plasma torch for supersonic plasma spray at atmospheric pressure [Text] / F. R. Caliarria [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 237. – P. 351–360.
4. Verlotski, V. Coatings of Carbide-Metal Systems (Cr₃C₂-NiCr and WC-Co-Cr) Deposited by High-Velocity Atmospheric Plasma Spraying from Specially Modified Fine-Grained Powders [Text] / V. Verlotski // Journal of Thermal Spray and Engineering. – 2018. – Vol. 1 (1). – P. 18–23.
5. What Do We Know, What are the Current Limitations of Suspension Plasma Spraying? [Text] / P. Fauchais [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24, iss. 7. – P. 1120–1129.
6. Compact solid oxide fuel cells and catalytic reformers based on microtubular membranes [Electronic resource] / M. P. Popov [et al.]. – Electronic text data // Catalysis Today. – 2018. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586118315244?via%3Dihub> (14.11.2018). – DOI: 10.1016/j.cattod.2018.11.009.
7. Optical study of supersonic jet structure in atmospheric plasma spraying [Text] / I. P. Gulyaev [et al.] // XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (13–19 August, 2018, Novosibirsk). – Novosibirsk, 2018. – Pt. 1. – P. 030066. – DOI: 10.1063/1.5065160.
8. Особенности формирования износостойких покрытий с помощью сверхзвукового плазматрона [Текст] / В. И. Кузьмин [и др.] // Пленки и покрытия-2017 = Films and Coatings-2017 : труды 13-й международной конференции, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2017 г. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 97–100.
9. Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology [Text] / I. P. Gulyaev [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24, iss. 8. – P. 1566–1573. – DOI: 10.1007/s11666-015-0356-6.
10. Анализ и оптимизация газотермического напыления по скорости и температуре конденсированной фазы потока [Текст] / А. В. Долматов [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 1 (103). – С. 83–94.
11. Gulyaev, I. P. Diagnostic system «Yuna» for disperse phase properties control in plasma and laser powder deposition processes [Text] / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov // International Congress «Energy Fluxes and Radiation Effects» (EFRE 2018). – Tomsk, 2018. – P. 032072. – DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032072.
12. Structural features of the coatings of the Ni-Al system obtained by air-plasma spraying [Text] / E. E. Kornienko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 286, conf. 1. – P. 012028. – DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012028.
13. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий из Ni₃Al [Текст] / Е. Е. Корниенко [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6 (102). – С. 957–966.
14. Visualization of interaction of Mach waves with a bow shock [Text] / A. A. Pavlov [et al.] // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017) (5–9 June 2017, Novosibirsk). – Novosibirsk, 2017. – P. 030068.
15. Application of saturable absorption adaptive visualizing transparencies to obtain flow density fields [Text] / A. A. Pavlov [et al.] // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017) (5–9 June 2017, Novosibirsk). – Novosibirsk, 2017. – P. 030079.

16. Павлов, А. А. Расширение возможностей теневых и интерференционных методов исследования газовых потоков [Текст] : автореферат диссертации ... кандидата физико-математических наук : 01.02.05 : защищена 16.10.2009 / А. А. Павлов. – Новосибирск, 2009. – 19 с.

17. Гуляев, И. П. Плазменная обработка дисперсных материалов [Текст] : монография. Ч. 1. Физические основы / И. П. Гуляев. – Ханты-Мансийск : УИП ЮГУ, 2013. – 115 с.

18. Increasing accuracy of high temperature and speed processes micropyrometry [Text] / M. P. Boronenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2015. – Vol. 93, conf. 1. – P. 012021. – DOI:10.1088/1757-899X/93/1/012021.