

УДК 621.891:9.048

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

С. Н. ГРИГОРЬЕВ^а, О. Б. КОВАЛЕВ^{б+}, В. И. КУЗЬМИН^б, А. А. МИХАЛЬЧЕНКО^б,
Н. А. РУДЕНСКАЯ^в, Н. Г. СОКОЛОВА^г, В. М. ФОМИН^б

Предлагается плазменный метод получения износостойких покрытий, который позволяет напылять порошки различной дисперсности и состава, и получать покрытия с низкой пористостью и повышенной твердостью. Керамический или металлический порошок подается в поток термической плазмы, где осуществляется равномерный нагрев частиц за счет использования новой конструкции плазмотрона с межэлектродной вставкой и коаксиальным вводом порошка в струю плазмы. При этом обеспечивается высокая производительность напыления с возможностью управления составом и качеством напыляемого слоя. Проведены теплофизические и технологические исследования эффективности формирования высокотемпературного гетерогенного потока и напыления покрытий из порошков металлов (фракция 40–100 мкм) и оксида алюминия с основным размером частиц 28–40 мкм при использовании узла кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой. Исследован характер истечения частиц Al_2O_3 из радиально-кольцевой щели ввода порошка транспортирующим газом. Представлены статистические распределения температуры и скорости частиц на оси плазменной струи. Установлены размеры области плазменного потока, в которой частицы максимально проплавляются. Приводятся результаты по напылению и исследованию свойств покрытий.

Ключевые слова: плазменное напыление, плазмотрон, порошок, керамика, металл, износостойкое покрытие, микроструктурный анализ, диагностика.

Введение. Керамические порошки на основе оксидов металлов используются для нанесения покрытий, стойких к абразивному износу, а также к износу в условиях трения скольжения [1–3]. Из-за большого электрического сопротивления, низкой теплопроводности и высокой жаростойкости, оксидная керамика широко используется в качестве электроизоляционных и термобарьерных покрытий [4–6]. Одним из эффективных методов нанесения керамических покрытий, благодаря своим высоким энергетическим возможностям, является плазменное напыление [7, 8].

Как в отечественных, так и в зарубежных установках плазменного напыления широко используются электродуговые плазмтроны постоянного тока [9]. Именно этот тип плазмтронов реализует высокую концентрацию энергии в малом объеме, обеспечивает стабильность параметров плазменных потоков, а так же обладает простой и удобной в эксплуатации схемой электропитания.

Для плазменного напыления различных покрытий нами разработан электродуговой плазмтрон постоянного тока номинальной мощностью 50 кВт. Плазмтрон выполнен по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой [10] и рассчитан на работу в турбулентном, переходном и ламинарном режимах истечения плазменных струй, что позволяет с высокой эффективностью напылять как металлические, так и керамические порошки. Существенной модернизацией плазмтрона явилась разработка узла кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой.

а Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”. Россия, 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

б Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН. Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

в Научно-технологический парк Белорусского национального технического университета “Политехник”. Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, д. 24.

г Полоцкий Государственный Университет. Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: kovalev@itam.nsc.ru.

Способ и место ввода напыляемого порошка является одной из наиболее важных конструктивных особенностей плазмотронов. Теоретические расчёты показали, что кольцевой ввод порошка в струю плазмы позволяет увеличить эффективность нагрева, проплавления частиц и повысить производительность напыления более чем на порядок.

В настоящей работе приведены результаты теплофизических и технологических исследований эффективности формирования износостойких металлических и керамических (из оксида алюминия) покрытий при использовании узла кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой.

Теплофизические исследования включали измерения параметров (скорость, температура одиночных частиц и их статистические распределения) порошка Al_2O_3 фракции 34 ± 6 мкм с применением лазерно-оптического диагностического комплекса [11, 12] в струе напылительного плазмотрона для случая кольцевого распределенного ввода порошка в поток термической плазмы [13] (рис. 1).

Визуализация гетерогенного потока при холодной продувке с подачей порошка транспортирующим газом, рис. 2, выполненная для области ввода порошка (без ввода фокусирующего газа) при помощи лазерного ножа, иллюстрирует формирование плотного осесимметричного газодисперсного течения. Видно, что значительная часть частиц, испытав столкновение, гасит радиальную составляющую скорости и продолжает движение вдоль оси струи.

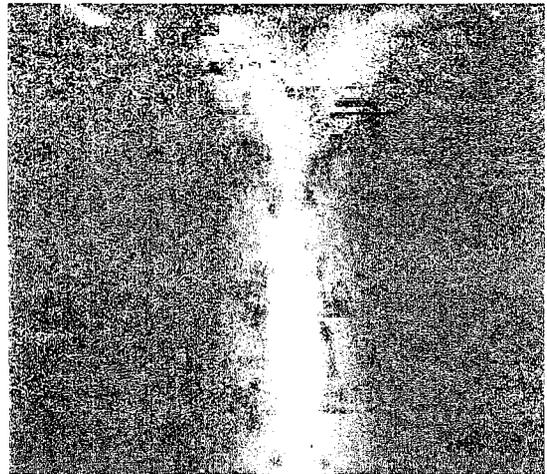
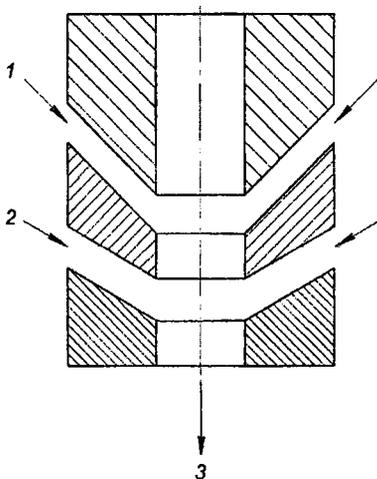


Рис. 1. Схема узла кольцевой инжекции порошка: 1 — транспортирующий газ с частицами; 2 — фокусирующий газ; 3 — высокотемпературный поток с частицами

Рис. 2. Фотография струи порошка Al_2O_3 , истекающей из радиально-кольцевой щели напылительной сопловой головки

В качестве плазмообразующего, защитного, транспортирующего и фокусирующего газов могут использоваться как любые технически чистые газы, так и обычный воздух [14]. В данных экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовался воздух. Для уменьшения эрозии медного анода и обеспечения распределенной привязки дуги на аноде в качестве защитного газа использовалась смесь воздуха и пропан-бутана. Для увеличения тепловой мощности струи и связывания кислорода плазмообразующего воздуха и воздуха, инжектируемого в поток плазмы из окружающей среды, пропан-бутан добавлялся также в фокусирующий и транспортирующий газы. Рабочие параметры плазмотрона были следующие: ток $I = 200$ А, напряжение $U = 225$ В, расход плазмообразующего газа (воздух) $G_{пл.(Air)} = 1$ г/с, завеса анода $G_{зав.(воздух+пропан)} = 0,183$ г/с ($G_{зав.(Air)} = 0,18$ г/с, $G_{зав.(пропан)} = 0,003$ г/с), транспортирующий газ $G_{тр.(воздух+пропан)} = 0,35$ г/с ($G_{тр.(Air)} = 0,20$ г/с, $G_{тр.(пропан)} = 0,15$ г/с), фокусирующий газ $G_{фок.(воздух+пропан)} = 0,35$ г/с ($G_{фок.(Al)} = 0,20$ г/с, $G_{фок.(пропан)} = 0,15$ г/с).

На рис. 3 представлены статистические распределения (~ 300 частиц) температуры (а) и скорости (б), измеренные на оси плазменной струи на расстоянии 100 мм от среза выходного сопла плазмотрона.

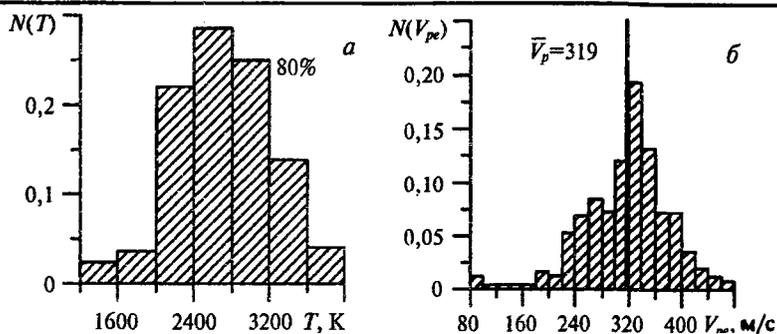


Рис. 3. Распределение параметров частиц по температуре (а) и скорости (б) в точке струи $z = 100$ мм, $x = 0$, $y = 0$

Данные статистические распределения позволяют определить долю прогретых частиц (излучающих достаточное для регистрации количество энергии, температура которых выше 1500 К), а также нагретых выше температуры плавления материала Al_2O_3 (2330 К). В данной точке струи доля расплавленных частиц составила 80%, что свидетельствует о достаточно высокой однородности агрегатного состояния частиц в потоке (в проведённых ранее исследованиях плазмотрона с самоустанавливающейся длиной дуги и точечным вводом порошка доля расплавленных частиц не превышала 30%) [15]. Скорость частиц лежит в широком диапазоне $180 \div 480$ м/с со средним значением 319 м/с.

Представленные на рис. 4 и 5 осевые распределения параметров частиц показывают, что область максимально проплавленных частиц лежит в диапазоне $75 \div 150$ мм от среза выходного сопла. Видна динамика ускорения частиц в потоке. Максимальное значение осредненной скорости достигается на расстоянии ~ 100 мм.

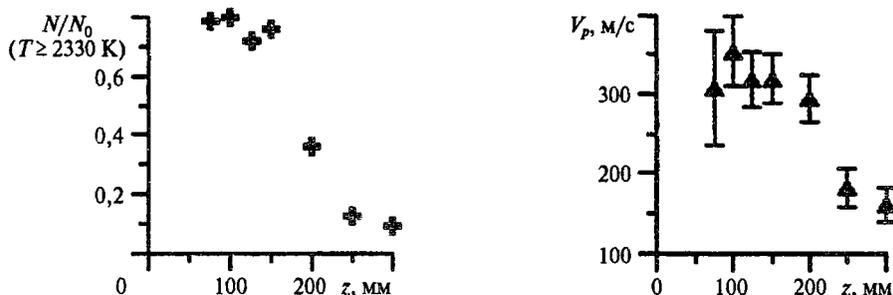


Рис. 4. Распределение доли частиц, нагретых выше температуры плавления, вдоль оси плазменной струи плазмотрона

Рис. 5. Осевые распределения скорости частиц, измеренные времяпролетным методом

Полученные данные о параметрах частиц в струе напылительного плазмотрона, с применением реализованной лазерно-оптической диагностики, были использованы при оптимизации режимов напыления.

Технологические исследования проводили следующим образом. В качестве исходного порошка использовали оксид алюминия Al_2O_3 с основным размером частиц $28-40$ мкм. Порошковые керамические покрытия наносили на стальные образцы плазменным методом, применяя при этом два способа ввода частиц в плазменный поток: односторонний точечный и распределено-кольцевой с различными режимными параметрами. Микроструктуру покрытий исследовали на микроскопе “Neophot-21” и микрорентгеноспектральном анализаторе “Jeol”. Износостойкость напыленных слоев оценивали по стандартной методике (ГОСТ 17367-71) на машине X-4Б. Условия изнашивания: абразив — наждачная бумага из SiC (размер зерна $50-63$ мкм); эталон — сталь 50, закаленная до HRC = $52-54$ ед.; путь трения — 15 м; нагрузка — 10 кг/см².

Сравнительный металлографический анализ напыленных слоев показал, что покрытия характеризуются высоким качеством границы раздела с основным металлом, на границе раздела отсутствуют поры. Пористость основного слоя при оптимальных режимных параметрах, в случае кольцевого ввода порошка, составляет менее 1% (рис. 6). Обычно, по данным разных авторов, пористость керамических покрытий составляет $8-15\%$.

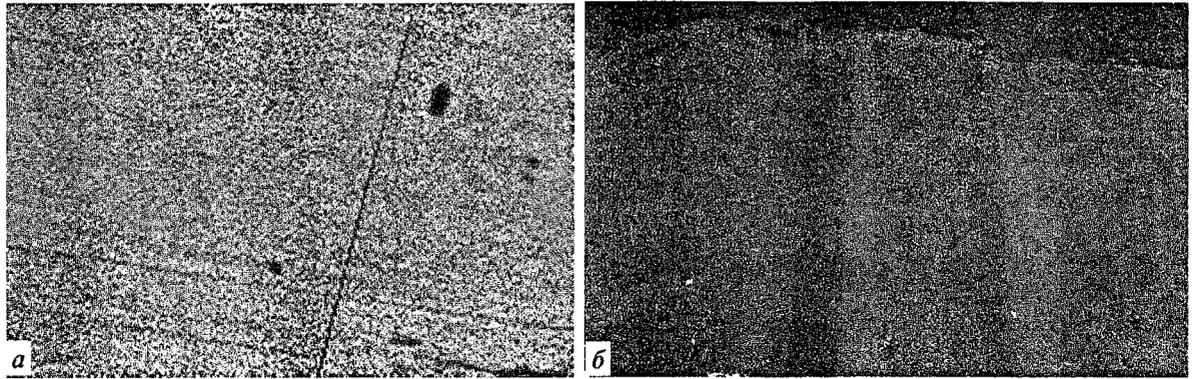


Рис. 6. Микроструктура основного слоя покрытия: а – ($\times 3000$), б – ($\times 500$)

В таблице приведены среднемассовые характеристики плазменных потоков (при переходе от режима 1 к режиму 3 повышался расход плазмообразующего газа от 1 до 1,5 и 2 г/с соответственно, следовательно, уменьшалась температура и увеличивалась скорость плазмы), реализованных в технологических экспериментах. Ток дугового разряда плазмотрона на всех режимах оставался неизменным и составлял 200 А.

Режимы напыления

Режим напыления	Температура плазмы, К	Скорость плазмы, м/с
1	7000	708
2	6750	970
3	6500	1225

Испытания износостойкости покрытий свидетельствуют о том, что при кольцевой транспортировке частиц в плазменный поток относительная износостойкость покрытий возрастает от 2,1 до 2,6 (рис. 7).

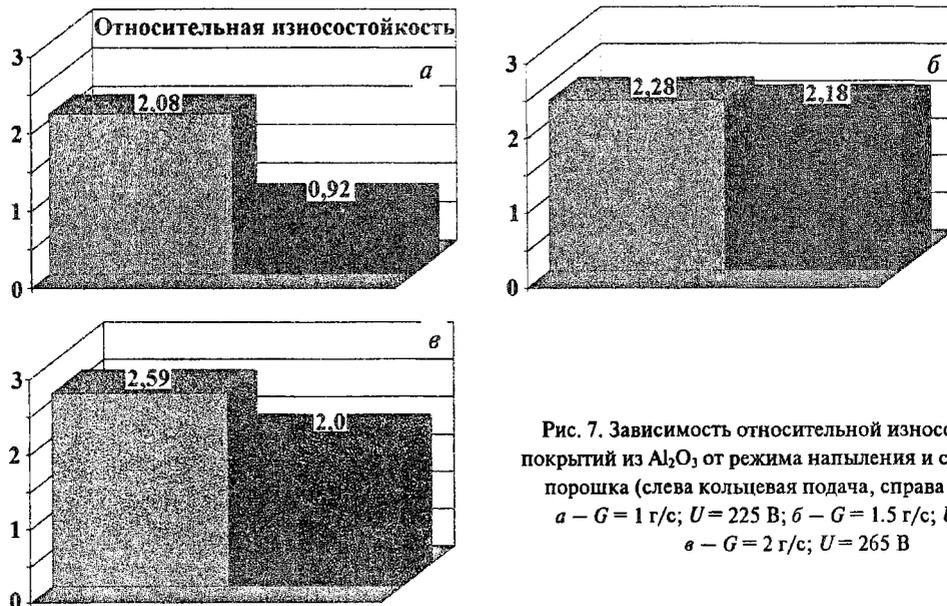


Рис. 7. Зависимость относительной износостойкости покрытий из Al_2O_3 от режима напыления и способа ввода порошка (слева кольцевая подача, справа точечная):
 а – $G = 1$ г/с; $U = 225$ В; б – $G = 1.5$ г/с; $U = 245$ В;
 в – $G = 2$ г/с; $U = 265$ В

В случае точечной подачи частиц рассматриваемый параметр резко возрастает при переходе от режима (1) к режиму (2) и далее незначительно уменьшается. Объяснить это можно, по-видимому, большим разбросом значений скорости и температуры частиц при точечной подаче порошка. Возрастание среднемассовой скорости потока плазмы, при увеличении расхода плазмообразующего газа от 1 до 1,5 г/с, сопровождается крайне незначительным снижением среднемассовой температуры плазмы и, соответственно, при достаточной доле расплавленных частиц имеет место существенный рост средней скорости напыляемых частиц, а это приводит к увеличению плотности покрытия и уменьшению толщины составляющих его микрослоёв, что, в свою очередь, приводит к

повышению износостойкости. Дальнейшее увеличение расхода плазмообразующего газа, в случае точечного ввода порошка, приводит к дальнейшему снижению времени пребывания частиц в плазменном потоке. Так как при данном способе ввода только некоторая часть частиц проходит через осевую высокотемпературную область плазменной струи, то получаемой доли расплавленных частиц уже недостаточно для формирования качественного покрытия. Данные режимные условия приводят к снижению плотности покрытия и инициируют появление в нём значительного количества микротрещин, что и объясняет уменьшение стойкости напыленных слоев к износу.

Предварительные исследования характеристик металлических покрытий, напылённых воздушной плазмой, показали существенное повышение их твёрдости по сравнению с паспортными данными твёрдости исходного материала. Напыление металлических порошков проводилось при следующих среднемассовых параметрах плазменных струй: температура — 6000 К, скорость — 2400 м/с. Предположительно данный эффект объясняется высокой степенью проплавления и большой скоростью напыляемых частиц, которые проходят через высокотемпературную и высокоскоростную приосевую область плазменной струи в случае их кольцевого ввода. А это, как и в случае керамических порошков, приводит к увеличению плотности покрытий и уменьшению толщин составляющих их микрослоёв. Для детального объяснения данного эффекта в настоящее время проводятся более глубокие исследования полученных покрытий.

Заключение. При кольцевом вводе напыляемых частиц на всех режимах основная доля напыляемого материала проходит через высокотемпературную и высокоскоростную осевую область плазменной струи. Поэтому при достаточной доле расплавленных частиц увеличение их скорости ведёт к снижению пористости покрытий и толщины составляющих его микрослоёв. Поэтому при переходе от режима 1 к режиму 3, в случае кольцевой инъекции, износостойкость керамических покрытий продолжает расти. Здесь необходимо отметить, что требуются дополнительные исследования для более полного изучения микроструктуры покрытий.

В целом сравнительные исследования покрытий, полученных при различных условиях ввода порошков в поток плазмы, показали, что кольцевая транспортировка обеспечивает стабильность, надёжность и высокое качество процесса напыления. И это очень важный момент для использования данной технологии в производственных условиях.

В заключение, на рис. 8—9, представлены некоторые примеры износостойких покрытий, полученных при упрочнении и восстановлении промышленных деталей с использованием разработанного напылительного плазменного оборудования.

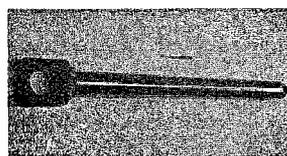
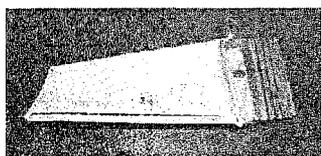


Рис. 8. Лопатка 1 ступени ротора турбины ДЖ59Л3 с термобарьерным керамическим покрытием ZrO_2

Рис. 9. Шток гидроцилиндра управления активным козырьком механической крепи с износостойким покрытием системы $Ni-Cr-B-Si-C$

Литература

1. Krasnovskii A. N. and Grigoriev S. N. A Study of the Process of Continuous Forming of Nanocrystalline Composite Powders // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2012 (54), nos. 1—2, 13—16
2. Grigoriev S. N. and Krasnovskii A. N. Study of the Triboengineering Characteristics of Ultradispersed Composite Powder Materials // *Journal of Friction and Wear*. 2011. Vol. 32 (3), 164—166
3. Uhlmann E., Hühns T., Richarz S., Reimers W., and Grigoriev S. Development and Application of Coated Ceramic Cutting Tools // *Industrial Ceramics*. — 2009 (29), no. 2, 113—118
4. Fominski V. Y., Grigoriev S. N., Romanov R. I., Zuev V. V., and Grigoriev V. V. Properties of Tungsten Oxide Thin Films Formed by Ion-Plasma and Laser Deposition Methods for MOSiC-Based Hydrogen Sensors // *Semiconductors*. — 2012 (46), no. 3, 401—409

5. Fominski V. Y., Grigoriev S. N., Celis J. P., Romanov R. I., and Oshurko V. B. Structure and Mechanical Properties of W–Se–C/Diamond-Like Carbon and W–Se/Diamond-Like Carbon Bi-Layer Coatings Prepared by Pulsed Laser Deposition // *Thin Solid Films*. — 2012 (520), no. 21, 6476–6483
6. Волосова М. А., Кузин В. В. Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 2012, № 1, 40–46
7. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., and Stolbovoy V. A. Physical Characteristics, Structure and Stress State of Vacuum-Arc Tin Coating. Deposition on the Substrate When Applying High-Voltage Pulse During the Deposition // *Problems of Atomic Science and Technology*. — 2011 (4), 174–177
8. Metel A., Grigoriev S., Melnik Y., Panin V., and Prudnikov V. Cutting Tools Nitriding in Plasma Produced by a Fast Neutral Molecule Beam // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 2011 (50), no. 8, part 2, 08JG04
9. Андреев А. А., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами // *Технология машиностроения*. — 2005, № 7, 47–52
10. Kuzmin V. I., Mikhal'chenko A. A., Nalivaiko V. I., and Chubakov P. A. Comparison of Thermophysical and Optical Methods of Temperature Distribution Measurements in Flow of Plasmatron with Interelectrode Inserts. *Изв. вузов. Физика*. — 2007 (50), № 9, 85–88
11. Михальченко А. А., Картаев Е. В., Ковалев О. Б., Наливайко В. И., Грачев Г. Н. Лазерно-оптическая диагностика параметров одиночных частиц в процессах лазерной наплавки и прямого наращивания материала / Сборник статей Двенадцатой международной научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. 8–10 декабря 2011 г., Санкт-Петербург, Россия // СПб: Изд-во Политехн. ун-та. — 2011, 258–262
12. Doubenskaia M., Pavlov M., Grigoriev S., Tikhonova E., and Smurov I. Comprehensive Optical Monitoring of Selective Laser Melting // *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. — 2012 (7), no. 3, 236–243
13. Kuzmin V. I., Mikhal'chenko A. A., Kovalev O. B., Kartayev E. V., and Rudenskaya N. A. The Technique of Formation of the Axisymmetric Heterogeneous Flow for Thermal Spraying of Powder Materials // *J. of Thermal Spray Technology*. — 2012 (21), no. 1, 159–168
14. Metel A. S., Grigoriev S. N., Melnik Y. A., and Panin V. V. Filling The Vacuum Chamber of a Technological System With Homogeneous Plasma Using a Stationary Glow Discharge // *Plasma Physics Reports*. — 2009 (35), no. 12, 1058–1067
15. Guseynikov S. M., Zavarzin A. G., Lyagushkin V. P., Mikhalchenko A. A., and Solonenko O. P. Application of Multifunctional Laser Optical Apparatus in Investigation of Heterogeneous Plasma Jets // *Proc. 10th Intern. Symposium on Plasma Chemistry, Bochum, FRG, Aug. 4–9, 1991*. — 1991 (1), 1–6

Поступила в редакцию 18.01.13.

Grigoriev S. N., Kovalev O. B., Kuzmin V. I., Mikhal'chenko A. A., Rudenskaya N. A., Sokolova N. G., and Fomin V. M. New Possibilities of Technology of the Plasma Spray of Wear-Resistant Coatings.

The plasma method of receiving wear-resistant coatings with low porosity and increased hardness is offered. Ceramic or metal powder moves in a stream of thermal plasma where uniform heating of particles by the use of a new design of a plasmatron is carried out. High efficiency of a plasma spray with possibility of control of structure and quality of a spraying layer is thus provided. Thermophysical and technological researches of efficiency of formation of a high-temperature heterogeneous stream and plasma spraying of powders of metals (fraction 40–100 μm) and aluminum oxide with the size of particles of 28–40 μm are conducted when using the ring input of powder with gas focusing. Statistical distributions of temperature and speed of particles along the axes of a plasma stream are presented. The size of area of a plasma stream in which particles are melted is established. Results on research of properties of coatings are given.

Keywords: plasmatron, powder, ceramics, metal, plasma spray, diagnostics, microstructural analysis, wear-resistant coatings.