

УДК 681.2.083

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ЧАСТИЦ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ В ПРОЦЕССЕ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

¹Бороненко М.П., ²Гуляев И.П., ¹Гуляев П.Ю., ³Демьянов А.И., ¹Долматов А.В.,
⁴Иордан В.И., ³Коржик В.Н., ³Кривцун И.В., ³Харламов М.Ю.

¹Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, e-mail: m_boronenko@ugrasu.ru;

²Институт прикладной и теоретической механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, e-mail: gulyaev@itam.nsc.ru;

³Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, e-mail: demjanov@ukr.net;

⁴Алтайский государственный университет, Барнаул, e-mail: jordan@phys.asu.ru

Рассмотрены физические принципы работы и конструкция устройств плазменно-дугового напыления. Отмечается преимущество дуговой технологии для формирования металлизационной струи, заключающееся в отсутствии одного из самых ненадежных узлов газотермических установок напыления – порошкового дозатора. Обсуждается ряд новых нерешенных вопросов физического механизма дробления расплава электрода под действием интенсивного потока газовой плазмы. Сформулированы особенности образования частиц конденсированной фазы во внешней электрической дуге плазмотрона. Приведена математическая модель нагрева и переноса частиц в плазме. Продемонстрированы методы определения скорости и температуры частиц в плазменном потоке с помощью высокоскоростной видеокамеры с микроканальным фотоумножителем и наносекундным электрооптическим затвором. Сопоставление скорости и температуры одиночных частиц с теоретической моделью показало хорошее соответствие расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: плазма, электрическая дуга, напыление, температура, скорость, измерение

METHODS OF CONTROL OF TEMPERATURE AND VELOCITY OF PARTICLES OF THE CONDENSED PHASE IN THE PROCESS OF PLASMA-ARC SPRAYING

¹Boronenko M.P., ²Gulyaev I.P., ¹Gulyaev P.Y., ³Demyanov A.I., ¹Dolmatov A.V.,
⁴Jordan V.I., ³Korzhik V.N., ³Krivtun I.V., ³Kharlamov M.Y.

¹Yugra State University, Khanty-Mansiysk, e-mail: m_boronenko@ugrasu.ru;

²Institute of Applied and Theoretical Mechanics of S.A. Khristianovich of the Siberian
Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, e-mail: gulyaev@itam.nsc.ru;

³Institute of electric welding of E.O. Paton of National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev, e-mail: demjanov@ukr.net;

⁴Altay State University, Barnaul, e-mail: jordan@phys.asu.ru

Physical principles of operation and construction of devices dusting plasma-arc are viewed. Advantage of the arc technology to formation of the metalized stream, consisting in lack of one of the most unreliable knots gas-thermal of installations of a dusting – a magnetic character dosing mechanism is scored. A series of new unresolved questions of the physical mechanism of crushing of a melt of an electrode under the influence of an intensive stream of gas plasma is discussed. Features of formation of particles of a condensed phase in an exterior electrical arc of a plasma generator are formulated. The mathematical model of a heating and transport of particles in plasma is given. Methods of definition of velocity and temperature of particles in a plasma stream by means of a high-speed video camera with the micro channel photomultiplier and a nanosecond electro shutter are shown. Comparison of velocity and temperature of single particles with theoretical model has shown good conformity of calculations with experimental data.

Keywords: plasma, electric arc, spraying, temperature, velocity, measurement

Получение защитных и упрочняющих покрытий с заранее заданными и воспроизводимыми характеристиками любым из газотермических методов напыления может быть обеспечено только при постоянном контроле ключевых физических параметров – КФП, таких как скорость и температура частиц в напылительной струе [7]. Традиционный механизм ввода порошка в плазменную струю с помощью транспортирующего газа существенно меняет энтальпию и ламинарность потока, что определяет актуальность разработки высо-

костабильных проволочных дозаторов [11], обеспечивающих генерацию или инъекцию [14] частиц конденсированной фазы в широком диапазоне объемных концентраций. И если вопросам диагностики параметров двухфазных потоков в процессах порошкового напыления [5] уделяется достаточно много внимания, то явление распыления проволочных материалов все еще остается малоизученным [6]. Вместе с тем появляются новые перспективные способы напыления, использующие в качестве исходного материала для формирования покрытий

прутки и проволоки. Примером такого способа может быть плазменно-дуговое напыление покрытий, при котором расплывается токоведущая проволока-анод, постоянно подаваемая в плазменную дугу за срезом сопла плазмотрона. В свою очередь, совершенствование конструкций плазмотронов с проволокой-анодом, а также повышение качества формируемых покрытий, неотрывно связано с развитием методов контроля параметров напыляемых частиц в плазменном потоке, а также экспериментальными измерениями их тепловых и динамических характеристик.

Экспериментальный комплекс плазменно-дугового напыления

Метод плазменно-дугового проволоочного напыления является дальнейшим развитием методов [10, 15], использующих электрическую дугу в качестве источника энергии, и он основан на синтезе известных методов плазменного и электродугового напыления [1].

Сущность метода плазменно-дугового напыления заключается в следующем. Дуга постоянного тока горит между тугоплавким водоохлаждаемым катодом и плавящейся токоведущей проволокой, подаваемой за срезом двойного сопла плазмотрона (рис. 1).

Поступающий через сопло рабочий (плазмообразующий) газ нагревается электрической дугой и истекает из сопла в виде плазменной струи. Открытый участок разряда, вне формирующей плазму канала, обдувается потоком защитного газа или воздуха, истекающего из кольцевого зазора между соплами плазмотрона.

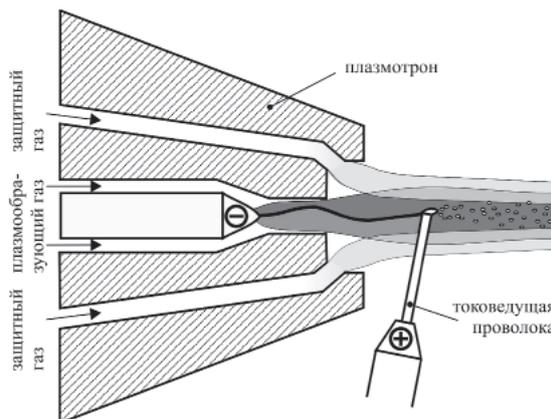


Рис. 1. Схема процесса плазменно-дугового проволоочного напыления

В итоге плазменно-дуговое проволоочное напыление от традиционного процесса плазменного напыления отличается, прежде всего, наличием расходуемой токоведущей проволоки, являющейся анодом плазменной дуги, а также существованием открытого участка столба дуги. Плавление проволоки при этом осуществляется как за счет энергии, выделяющейся в анодном пятне дуги, и протекания по проволоке электрического тока, так и за счет энергии, вводимой в проволоку при обтекании ее плазменной струей. В результате эффективность процесса плавления проволоки существенно возрастает по сравнению, например, с процессом электродуговой металлизации. На рис. 2 приведены внешний вид плазмотрона установки для плазменно-дугового напыления в режиме горения дежурной дуги, а также в процессе распыления порошковой проволоки.



а



б

Рис. 2. Внешний вид плазмотрона установки для плазменно-дугового напыления: а – в режиме горения дежурной дуги; б – в процессе распыления порошковой проволоки

К особенностям процесса плазменно-дугового напыления также следует отметить то, что плавление и струйное течение материала проволоки происходит в защит-

ной атмосфере плазмообразующего газа (как правило, аргона), а дробление расплава и разгон дисперсных частиц происходит в плазменной струе, обжатой спутным

потоком воздуха. Это обеспечивает минимальные потери на испарение материала проволоки, минимальное его насыщение кислородом и азотом воздуха, получение оптимального фракционного состава дисперсной фазы, достижение частицами напыляемого материала околосвуковой скорости в момент встречи с основой, получение наиболее высокой объемной концентрации напыляемых частиц и минимального угла раскрытия двухфазного потока, составляющего несколько градусов. Эти обстоятельства создают предпосылки для вывода получаемых таким способом покрытий на современный конкурентоспособный уровень.

Процесс плазменно-дугового напыления покрытий с токоведущей самораспыляющейся проволокой реализуется на установке PLAZER 30-PL-W, предназначенной для нанесения износостойких, коррозионностойких и специальных покрытий, восстановления изношенных деталей машин путем напыления электропроводящих материалов, изготовленных в виде порошковых и компактных проволок диаметром 1,6–1,8 мм. Толщина наносимых покрытий – 0,05–5 мм (и более). В качестве рабочих газов применяются сжатый воздух и аргон. Проведенные лабораторные исследования полученных плазменно-дуговых покрытий показали, что метод обеспечивает формирование покрытий с повышенными плотностью (пористость 0,5–2,5%), прочностью сцепления с основой (не менее 50 МПа при нормальном отрыве), когезионной прочностью, а также предотвращение выгорания легирующих элементов в процессе напыления покрытия.

Математическая модель движения и нагрева частиц в плазме

В задачах термической обработки и напыления материалов важнейшее значение имеет поведение частиц размером 20–100 мкм в начальный период их пребывания в струе. При определенных упрощениях в анализе процесса удается получить аналитические выражения для скорости и температуры таких частиц. В основу теоретической модели движения и нагрева макроскопических частиц в потоке плазмы взяты классические положения тепломассопереноса в гетерогенных плазменных потоках, которые в каждом конкретном случае могут быть применены с учетом поправок на процессы плавления, сублимации и конвективного перемешивания и образования газовых полостей в веществе расплавленных частиц [4, 9, 14].

Рассмотрим одномерное движение одиночной сферической частицы диаметром D_p , которая была помещена в равномерный

плазменный поток со скоростью U_f и температурой T_f . В начальный момент времени $t = 0$ скорость частицы равна нулю, а температура – начальному значению T_{p0} . Будем считать, что температура сферы в каждый момент времени равномерна по объему (число Био $Bi \ll 1$), радиационными потерями пренебрегаем. Тогда изменение скорости U_p и температуры T_p частицы определяются уравнениями:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot C_d \cdot \frac{1}{2} \rho_f (U_f - U_p)^2; \quad (1)$$

$$c_p m_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha \cdot \pi D_p^2 \cdot (T_f - T_p). \quad (2)$$

В приведенных выше обозначениях c_m – теплоемкость материала частицы; m_p – ее масса; ρ_f – плотность газа (плазмы) при температуре T_f . Коэффициент лобового гидродинамического сопротивления сферы C_d и коэффициент теплоотдачи α вычисляются по эмпирическим зависимостям, которые в основном получены при исследовании обтекания тел низкотемпературными потоками.

Можно показать [1], что в случае однородного плазменного потока ($U_f = \text{const}$ и $T_f = \text{const}$) решением уравнений (1, 2) являются экспоненциальные зависимости следующего вида:

$$U_p = U_f \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_D}} \right); \quad (3)$$

$$T_p = T_{p0} + (T_f - T_{p0}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (4)$$

При этом в расчетах известными параметрами в уравнениях (1) и (2) считаются m_p , C_d , ρ_f , T_{p0} и D_p , а экспериментально определению с помощью скоростной видеосъемки поддаются динамические параметры уравнений (3) и (4) – постоянные времени ускорения $\tau_D = \frac{8}{\pi D_p^2} \cdot \frac{m_p}{C_d \rho_f}$ и нагрева

и $\tau_T = \frac{c_p m_p}{\alpha \pi D_p^2}$. Эти постоянные имеют физи-

ческий смысл интервала времени, которое понадобилось частице, чтобы достичь скорости (температуры) плазмы, если бы она двигалась с начальным ускорением (нагревалась с начальной интенсивностью). Отметим, что в рамках данной модели также возможна постановка и корректное решение обратной задачи, т.е. оценка значений температуры и скорости плазмы по результатам

высокоскоростной регистрации динамики нагрева и ускорения калиброванных частиц с известными теплофизическими свойствами. Применение для этих целей безынерционных (в динамическом и тепловом смысле) частиц нанометрового размера, которые часто используются для диагностики пламен, невозможно в связи с высокой температурой плазменного потока, обуславливающей практически мгновенное испарение или сублимацию материала.

Методика определения температуры и скорости отдельных частиц

Экспериментальная методика регистрации треков самосветящихся нагретых частиц в плазме основана на применении специализированных высокоскоростных видеокамер с параллельным считыванием сигнала [4, 12]. Примеры регистрации треков представлены на рис. 3 и 4.

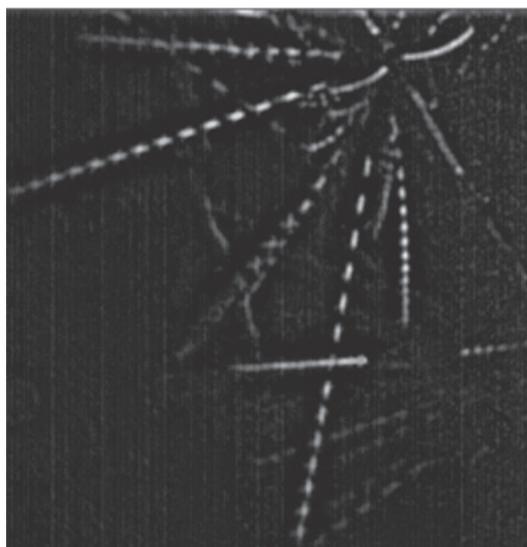


Рис. 3. Регистрация потока нагретых частиц в режиме мультиэкспозиции

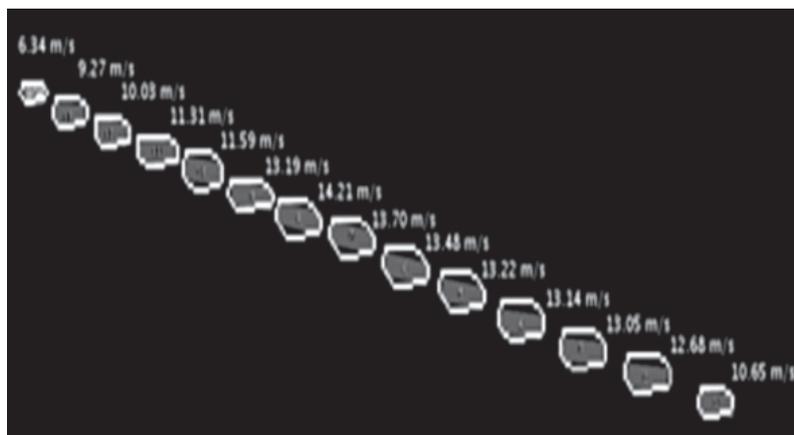


Рис. 4. Стробоскопическая регистрация трека отдельной частицы в потоке низкотемпературной плазмы

Для повышения точности измерения времяпролетных данных о движении частиц применялся оптический затвор с наносекундным быстродействием «NanoGate», а для увеличения чувствительности при малых временах экспозиции использовался фотоумножитель на микроканальных пластинах.

В режиме m -кратной экспозиции (мультиэкспозиции) с заданным интервалом тепловое излучение летящей частицы фиксируется на одном кадре m раз. Это позволяет провести детальный анализ не только динамического параметра ускорения движения τ_D , но и нагрева τ_T . На рис. 5 и 6 приведены результаты обработки стробоскопического трека отдельной частицы с аппроксимацией динамических параметров τ_D и τ_T в виде экспоненциальных решений (3) и (4).

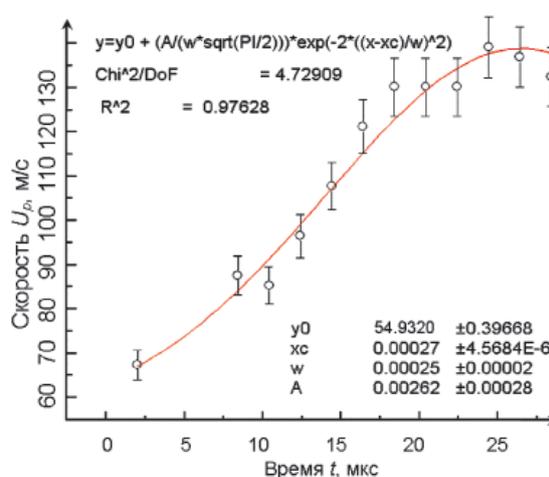


Рис. 5. Определение скорости частицы по ее треку

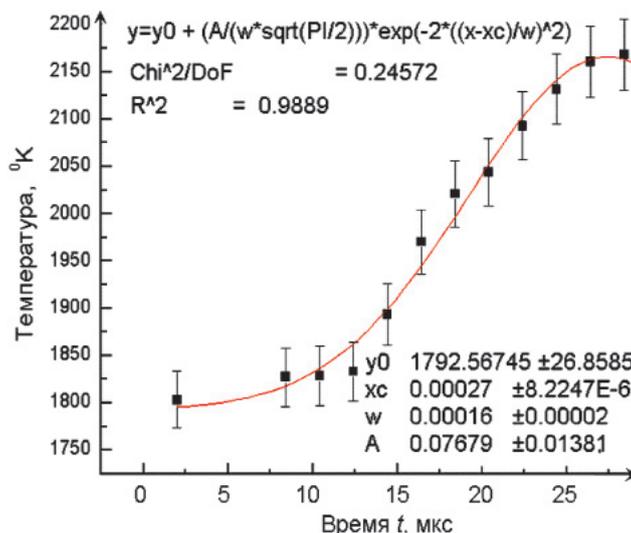


Рис. 6. Определение температуры частицы по треку

Приведенная методика эксперимента оправдана при анализе отдельных частиц [5] и слабо запыленных плазменных струй [3], но при увеличении количества конденсированной фазы необходимо учитывать ее взаимодействие с потоком плазмы, который имеет ограниченную нагрузочную и пропускную способность, что отражается в виде фундаментальной диаграммы потока [9].

Выводы

Новая газотермическая технология – плазменно-дуговое напыление – позволяет формировать покрытия из металлов и проводящих материалов со значениями плотности и адгезии, характерными лишь для высокоскоростных методов – детонационное или газопламенное (HVOF) напыление. При этом простота конструкции установки, высокая производительность напыления и возможность работы в условиях открытой атмосферы являются несомненными конкурентными преимуществами нового метода.

Экспериментальная методика бесконтактного оптического контроля скорости и температуры частиц в процессе плазменно-дугового напыления позволяет:

▲ по скорости частиц, выносимых с торца плавящегося электрода, следить за постоянством механизма дробления расплава на капли и управлять этим процессом путем изменения величины тока дуги;

▲ верифицировать неизвестные параметры тепломассопереноса в математических моделях расчета двухфазной плазменной струи по трекам отдельных частиц;

▲ определить регулировочные закономерности, связывающие производительность установки напыления с температурой и скоростью напылительной струи.

Список литературы

1. Бороненко М.П., Гуляев И.П., Серегин А.Е. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 7–15.
2. Виновский критерий выбора параметров редукции температурного распределения частиц по их суммарному тепловому спектру / П.Ю. Гуляев, В.И. Иордан, И.П. Гуляев, А.А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 9–3. – С. 69–76.
3. Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Иордан В.И. Разрешающая способность виртуальных приборов контроля температуры частиц в плазменных потоках по суммарному спектру // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 13–14.
4. Гуляев П.Ю., Гуляев И.П. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 1.1(35). – С. 144–148.
5. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Автоматизация контроля теплофизических параметров в технологиях детонационного напыления // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 1.2 (35). – С. 230–233.
6. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – № 5–2. – С. 382–385.
7. Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках / П.Ю. Гуляев, А.В. Долматов, В.А. Попов, Г.Н. Леонов // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 4–7.
8. Нагрев и плавление проволоки-анода при плазменно-дуговом напылении / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, С.В. Петров // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5. – С. 5–11.
9. Новая технология «плазер» реновации деталей для железных дорог / В.Н. Коржик, И.В. Кривцун, С.В. Петров, М.Ю. Харламов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – № 1. – С. 20–22.
10. Об уточнении математической модели электрической дуги в плазматроне с внешней токоведущей проволокой / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, С.В. Петров, А.И. Демьянов // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. – С. 53–56.
11. Формирование пленки жидкого металла на торце проволоки-анода при плазменно-дуговом напылении / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, С.В. Петров // Автоматическая сварка. – 2011. – № 12. – С. 3–8.

12. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй дизельных форсунок / А.Е. Свистула, Д.Д. Матиевский, П.Ю. Гуляев, А.В. Еськов // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 29–31.

13. Gulyaev I.P. Production and modification of hollow powders in plasma under controlled pressure // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 441. – № 1. – P. 012033. doi:10.1088/1742-6596/441/1/012033

14. Gulyaev I.P., Solonenko O.P. Hollow droplets impacting onto a solid surface // Experiments in Fluids. – 2013. – Vol. 54. – № 1. – P. 1–12.

15. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface / Gulyaev I.P., Solonenko O.P., Gulyaev P.Y., Smirnov A.V. // Technical Physics Letters. – 2009. – Т. 35. – № 10. – P. 885–888

References

1. Boronenko M.P., Gulyaev I.P., Seryogin A.E. Model of a motion and heating of particles in plasma flow // Bulletin of Yugorsky state university. 2012. no. 2. pp. 7–15.

2. Wien's criterion of a choice of parameters of a reduction of temperature distribution of particles on their total thermal spectrum / P.Yu.Gulyaev, W.I. Jordan, I.P. Gulyaev, A.A. Solov'ev // Russian Physics Journal. 2008. Vol. 51. no. 9-3. pp. 69–76

3. I.P. Gulyaev, P.Yu. Gulyaev, W.I. Jordan Ability to distinguish virtual control devices of particles temperature in plasma streams on a total spectrum // Polzunov almanac. 2008. no. 2. pp. 13–14.

4. Gulyaev P. Yu., Gulyaev I.P. Simulation of master schedules of a plasma spraying of nanowidth coatings // Control systems and information technology. 2009. no. 1.1 (35). pp. 144–148.

5. Gulyaev P.Yu., Dolmatov A.V. Control automation ter-mophysical parameters in technologies of a detonation dusting // Control systems and information technology. 2009. no. 1.2 (35). pp. 230–233.

6. Gulyaev P.Yu., Dolmatov A.V. Physical principles of diagnostics in technologies of the plasma spraying // News of the Samara centre of science of the Russian Academy of Sciences. 2009. Vol. 11. no. 5–2. pp. 382–385.

7. Methods of optical diagnostics of particles in high-temperature streams / P.Yu.Gulyaev, A.V. Dolmatov, V.A. Popov, G.N. Leonov // Polzunov bulletin. 2012. no. 2/1. pp. 4–7.

8. Heat and wire-anode fusion at an arc plasma spraying / M.Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhik, S.V. Petrov // Automatic welding. 2011. no. 5. pp. 5–11.

9. New technique «plazer» renovations of details for railroads / V.N. Kopzhik, I.V. Krivtsun, S.V. Petpov, M.Yu. Kharlamov // Reconditioning, restoration, modernising. 2009. no. 1. pp. 20–22.

10. About specification of a mathematical sample piece of an electric arc in plasmatron with an external current carrying wire / M.Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhik, S.V. Petrov, A.I. Demianov // Automatic welding. 2009. no. 1. pp. 53–56.

11. Shaping of a film of liquid metal on a wire-anode back at an arc plasma spraying / M.Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhik, S.V. Petrov // Automatic welding. 2011. no. 12. P. 3–8.

12. Experimental research of characteristics of fuel streams of diesel atomizers / A.E. Svistula, D.D. Matievsky, P.Yu. Gulyaev, A.V. Eskov // Dvigatelistroenie. 1999. no. 1. pp. 29–31.

13. Gulyaev I.P. Production and modification of hollow powders in plasma under controlled pressure // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 441. no. 1. pp. 012033. doi:10.1088/1742-6596/441/1/012033

14. Gulyaev I.P., Solonenko O.P. Hollow droplets impacting onto a solid surface // Experiments in Fluids. 2013. Vol. 54. no. 1, pp.1–12.

15. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface / Gulyaev I.P., Solonenko O.P., Gulyaev P.Y., Smirnov A.V. // Technical Physics Letters. 2009. Vol. 35. no. 10. pp. 885–888.

Рецензенты:

Волков П.К., д.ф.-м.н., профессор, директор Института систем управления и информационных технологий, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск;

Мартынов С.И., д.ф.-м.н., директор Политехнического института Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.

Работа поступила в редакцию 08.10.2013.