

УДК 682.2.084

ОЦЕНКА СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В СТРУЯХ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

¹Бороненко М.П., ^{1,2}Гуляев 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: adolmatov@bk.ru;

²Институт теоретической и прикладной 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

Разработана система оптического контроля скорости и температуры дисперсной фазы потока плазменно-дугового напыления. На основе концепции виртуальных приборов в ней интегрированы камера технического зрения HD1-1312-1080-G2, фото-спектрометр LR1-T и среда MATLAB. Камера HD1-1312-1080-G2 использована в качестве средства сбора тепловизионных данных. На основе LR1-T построен канал спектральной пирометрии и контроля линейчатого спектра плазмы в диапазоне тепловизионного сенсора. Предложены модели измерения скорости и температуры напыляемых частиц по изображениям их треков. Предложен способ яркостной пирометрии подвижных объектов на основе данных калибровки по неподвижному температурному эталону. Приведены результаты экспериментальных исследований скорости и температуры дисперсной фазы в напылительных струях установки «Плазер» (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Киев). Работа выполнена в рамках совместного проекта РФФИ (№ 14-08-90428) и НАН Украины (№ 06-08-14), а также при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (задание № 2014/505 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части) и гранта Югорского государственного университета.

Ключевые слова: контроль, частицы, скорость, температура, плазменно-дуговое напыление

ESTIMATE OF DESPERSED PHASE VELOCITY AND TEMPERATURE IN PLASMA-ARC SPRAYING JETS

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

¹Yugra State University, Khanty-Mansiysk, e-mail: adolmatov@bk.ru;

²Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, e-mail: gulyaev@itam.nsc.ru;

³Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kiev, e-mail: demjanov@ukr.net;

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

A system for optical control of dispersed phase velocity and temperature in plasma-arc spraying was developed. Based on the virtual instruments concept it integrates technical vision camera HD1-1312-1080-G2 photo-spectrometer LR1-T and MATLAB environment. Camera HD1-1312-1080-G is applied for thermo-physical data acquisition. LR1-T spectrometer provides spectral pyrometry channel and control of plasma line spectrum in the spectral range of the image sensor. A new models for particles velocity and temperature calculation based on their track images are introduced. A brightness pyrometry method for temperature measurements of moving objects based on calibration using stationary temperature standard is introduced. Experimental results on dispersed phase velocity and temperature measurements in spraying jets of "Plazer" facility are presented (Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kiev). Work performed in the framework of the joint project of RFBR (№ 14-08-90428) and of National Academy of Sciences Ukraine (№ 06-08-14), and also supported in part by the Ministry of Education of Russia (№ 2014/505 task to perform public works in the field of scientific activity within the base portion) and a grant Ugra State University.

Keywords: control, particles, velocity, temperature, plasma-arc spraying

Газотермическое напыление является эффективным способом нанесения широкого круга защитных и функциональных покрытий на детали машин и целые изделия [1, 8]. Основные характеристики и качества покрытия определяются двумя важнейшими параметрами процесса: скоростью и температурой напыляемых частиц. В настоящее время только оптические измерительные системы способны предоставить требуемую информацию [2, 6]. Однако существующие

приборы контроля скорости и температуры напыляемых частиц характеризуются низкой точностью, невозможность измерения в потоках с высокой концентрацией дисперсной фазы и имеют недостаточное быстродействие. Наиболее сложной является задача измерения температуры, решение которой требует разработки новых методов с высокой разрешающей способностью [5, 9, 10].

Целью работы являлась разработка системы контроля скорости и температуры

частиц в потоке плазменно-дугового напыления. Для ее достижения решались следующие задачи:

1. Построение модуля сбора данных на базе камеры HD1-1312-1082-G2 (PhotonFocus, Швейцария) и спектрометра LR1-T (ASEQ Instruments, Канада).

2. Разработка методики обработки данных и ее реализация в виде программных объектов среды MATLAB.

3. Апробация системы контроля в ходе экспериментальных исследований скорости и температуры дисперсной фазы струи установки плазменно-дугового напыления «Плазер» [11] (институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Украина).

Система оптического контроля

В основе системы контроля лежит идея регистрации потока излучающих частиц в виде серии изображений их треков и определения параметров отдельных частиц в ходе анализа треков. В стационарном режиме работы установки статистические характеристики дисперсной фазы напылительной струи в каком-либо ее месте должны оставаться

постоянными во времени. Тогда оценку этих характеристик можно определить, проводя селекцию частиц, которые были идентифицированы в кадрах видеопотока.

Система контроля содержит два информационных канала. Первый канал используется для сбора тепловизионных данных о яркостной температуре дисперсной фазы потока напыления, а второй контролирует ее спектр излучения и спектральную температуру [3]. Сенсором первого канала выступает камера технического зрения. Методы обработки тепловизионной информации реализовать в физическом устройстве очень трудно. Поэтому структура системы контроля строилась с использованием концепции виртуальных приборов, которая предусматривает взаимодействие модулей сбора и обработки данных. Модуль сбора данных интегрировал оптическую подсистему, потоковую камеру HD1-1312-1082-G2 с интерфейсом Gigabit Ethernet и быстродействующий спектрометр LR1-T. Для реализации модуля обработки данных выбрана среда MATLAB. Структурная схема системы контроля приведена на рис. 1.

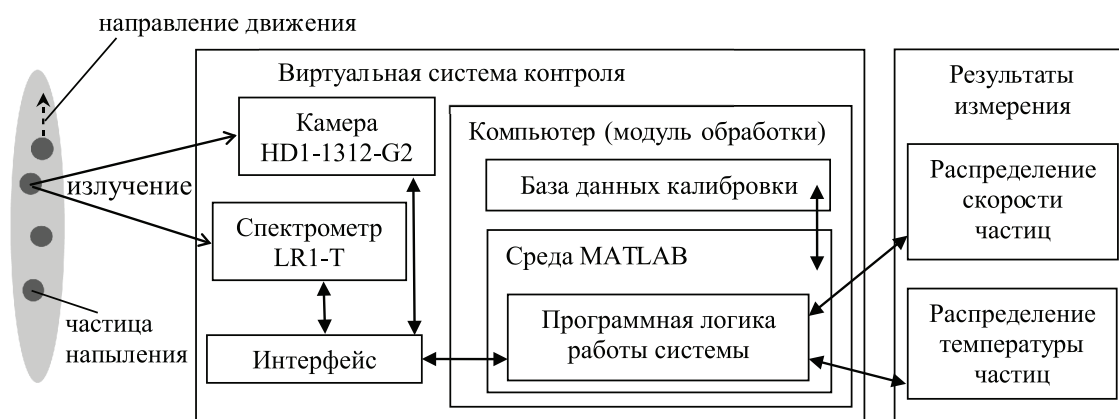


Рис. 1. Структурная схема системы контроля

Монохромная цифровая камера HD1-1312-1082-G2 в своем составе содержит КМОП-матрицу размером 1312×1082 фотоэлементов с диапазоном спектральной чувствительности 400–1000 нм. Сигнал ее сенсора представлен 12-разрядным цифровым кодом, а интерфейс позволяет в режиме реального времени передавать полноформатные данные в компьютер на скорости 55 кадров в секунду. Драйвер камеры поддерживает стандартный интерфейс среды MATLAB и дает возможность использовать ее в качестве источника при конвейерной обработке данных. Для проведения тепловизионных исследований в оптический канал камеры добавлен полосовой светофильтр SL-575-50 (ООО «Фотооптик», Обнинск)

с центральной (эффективной) длиной волны 575 нм и полушириной 50 нм, а также выполнена коррекция неоднородности сигнала ее сенсора и калибровка на автоматизированном стенде, состав и методика функционирования которого описаны в работе [4].

Цифровой спектрометр LR1-T имеет линейный датчик с 3648 фотоэлементами с размерами 8×200 мкм, термоэлектрический охладитель до –35 °С и обеспечивает измерения в спектральном диапазоне 200–1100 нм. Цифровые данные спектрометра, которые передаются в компьютер по интерфейсу USB 2.0, представлены 16-разрядным цифровым кодом. Для отображения спектрометра в среду MATLAB разработан M-класс объектов aSpectr, который пред-

ставляет его в виде виртуального прибора с набором свойств и методов. Для измерения спектральной температуры выполнена коррекция неоднородности сигнала датчика с помощью автоматизированного стенда и методики, описанных в работе [3].

Методика измерения скорости и температуры

В процессе газотермического напыления частицы размером 10–100 мкм нагреваются до температур 1000–3500 К, оставаясь при этом в конденсированной фазе – обычно в виде жидких капель сферической формы, а их тепловой спектр можно зарегистрировать в диапазоне от 300 до 1000 нм.

Для измерения скорости поток газотермического напыления помещается в фокальную плоскость оптической системы, а изображение частиц проецируется на матричный фотоприемник камеры, который работает по принципу накопления заряда в течение времени экспозиции длительностью τ . Величина τ выбирается так, чтобы частица успевала пройти прямолинейный путь, длина которого в 20–30 раз больше ее диаметра. При этом камера регистрирует не саму частицу, а траекторию ее движения – трек. Изображением сферической неподвижной частицы будет круг диаметра D , а трек движущейся частицы должен выглядеть как скругленный прямоугольник. При

этом длина перемещения кругового изображения сферической частицы L будет равна

$$L = Z - D, \quad (1)$$

где Z – максимальный (протяженный) размер скругленного прямоугольника (длина трека), а скорость движения частицы

$$v = \mu \cdot L / \tau, \quad (2)$$

где μ – масштабный коэффициент системы оптического контроля.

В среде MATLAB методика измерения скорости по тепловизионным данным реализована следующим образом. Для каждого кадра видеопотока строится маска и осуществляется морфологический анализ, в ходе которого проверяется связность областей бинарного изображения и выполняется его разделение на объекты, соответствующие отдельным вероятным трекам. Вероятные треки, которые касаются границ кадра, удаляются из изображения. Каждый выделенный объект подвергается анализу, направленному на определение видимого диаметра частицы, длины трека, координат его центра, ориентации, уровня сигнала. Чтобы исключить объекты, соответствующие «склеякам» треков, осуществляется фильтрация по длине, диаметру и отношению максимального к среднему уровню сигнала. Объекты, не удовлетворяющие параметрам фильтра, удаляются из изображения, а остальные считаются идентифицированными треками (рис. 2).

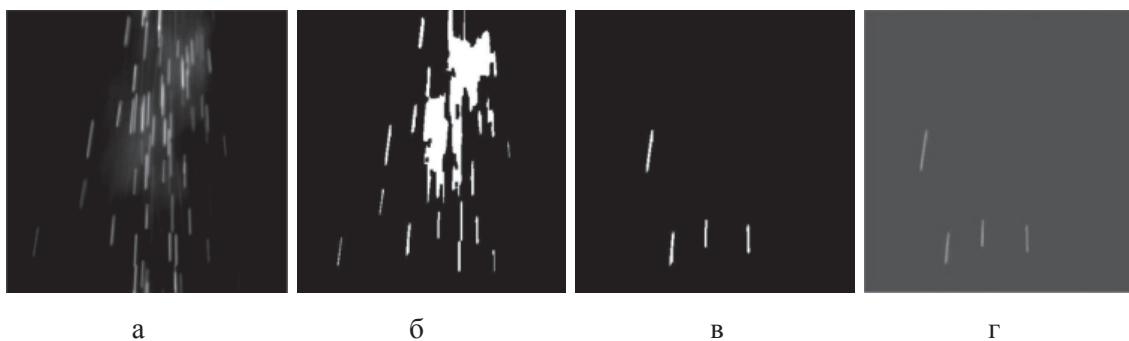


Рис. 2. Этапы обработки кадров видеопотока:
а – исходное изображение; б – бинарная маска; в – маска с вероятными треками;
г – обработанное изображение с идентифицированными треками

По параметрам идентифицированных треков определяется скорость частиц и ее статистика. Затем выполняется оценка математического ожидания с уровнем значимости 0,05. Треки, параметры которых попадают в доверительный интервал, считаются достоверными. Остальные отбрасываются, как вероятные ошибки методики.

С учетом диапазона измеряемых температур 1000–5000 К и «эффективной» длины волны светофильтра $\lambda_{\phi} = 575$ нм (све-

тофильтр SL-575-50) можно использовать приближение Вина для описания спектральной плотности потока излучения частиц.

В процессе измерения параметры оптоэлектронного тракта фиксированы, а сигнал фотоэлемента пропорционален энергии излучения частиц за время экспозиции τ и зависит только от температуры визируемого объекта:

$$F(T) = K \cdot \varepsilon(T) \cdot \exp\left(-\frac{C'}{T}\right), \quad (3)$$

где K – константа, включающая коэффициент оптоэлектронного преобразования, $C' = (h \cdot c) / (k \cdot \lambda_\phi)$; c – скорость света; h , k – постоянные Планка и Больцмана соответственно; $\varepsilon(T) = \varepsilon(\lambda_\phi, T)$ – спектральная излучательная способность материала частиц на эффективной длине волны λ_ϕ . В процессе калибровки по образцовой температурной лампе ТРУ-1100-2350 на основе (3) каждому значению сигнала фотозлемента F можно сопоставить яркостную температуру T_b и сохранить данные в виде таблицы:

$$(F_1, F_2, \dots, F_{255}) \Leftrightarrow (T_{b1}, T_{b2}, \dots, T_{b255}). \quad (4)$$

Обозначим F^n – сигнал, регистрируемый за время экспозиции τ фотозлемента датчика при условии неподвижности частицы, а S^n – площадь ее изображения. Если за время наблюдения температура частицы остается постоянной, то энергия теплового излучения, испущенная ею за равные промежутки времени, будет одинаковой. Предположим, что фотозлементами, которые сопряжены с внутренней областью трека площадью $S^{тр}$, зарегистрирован однородный уровень сигнала. Тогда должно выполняться следующее соотношение:

$$F^n \cdot S^n = F^{тр} \cdot S^{тр}. \quad (5)$$

Площадь модельного изображения неподвижной частицы и ее трека, соответственно, равны:

$$S^n = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad S^{тр} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + L \cdot D. \quad (6)$$

Введем обозначение яркостной температуры $T^{тр}$, которая соотносится с уровнем сигнала $F^{тр}$ по (3) и (4). Тогда на основе (3), (5), (6) температуру частицы можно определить так

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T^{тр}} + \frac{1}{C'} \left(\ln \varepsilon(T) - \ln \left(1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{L}{D} \right) \right). \quad (7)$$

Формула (7) позволяет измерять температуру подвижных объектов, а температурную калибровку тепловизионного сенсора осуществлять на неподвижном эталоне.

В процессе контроля по уровню сигнала идентифицированных треков и таблице (4) определяется температура $T^{тр}$. Далее с помощью параметров треков L , D и формулы (7) вычисляется термодинамическая температура частиц напыления при условии, что известна спектральная излучательная способность материала. В противном случае определяется их яркостная температура (при определении яркостной температуры $\varepsilon = 1$). Далее, как и в случае со скоростью, оценивается доверительный интервал для уровня значимости 0,05 и производится статистическая фильтрация.

Результаты исследования

Исследования, проводимые с помощью системы оптического контроля в институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, были направлены на изучение характеристик дисперсной фазы напылительных струй с целью оптимизации режимов работы установки плазменно-дугового напыления «Плазер». В процессе напыления покрытий распрыскивалась токоведущая проволока-анод, подаваемая с постоянной скоростью в плазменную дугу за срезом сопла плазмотрона [7]. Под действием дуги и плазмообразующего газа проволока различного состава плавилась, дробилась на капли размера 5–50 мкм и ускорялась к обрабатываемой поверхности. Система контроля имела окно визирования 2,9×2,4 см. Для оценки распределенных параметров во всей струе производилось сканирование рабочей области размером 16×8 см. С помощью спектрометра системы контролировалось отсутствие линий излучения плазмы в спектральном диапазоне тепловизионного канала и производилось измерение максимальной термодинамической температуры дисперсной фазы потока напыления. В итоге обработки массива видеофайлов, зарегистрированных на одном режиме работы установки, и объединения результатов их анализа найдены распределения параметров дисперсной фазы для всей напылительной струи (рис. 3) и пространственные зависимости статистических оценок температуры, скорости и направления движения частиц (рис. 4, а–в). Распределение объема выборок по сечениям струи приведено на рис. 4, г. Для рисунков приняты следующие обозначения: N – количество частиц; R – расстояние в метрах от оси струи; H – расстояние в метрах от среза сопла установки напыления.

Для построения распределений использована выборка, полученная на основе анализа 60000 достоверных треков. По количеству частиц, двигающихся на разных расстояниях от оси потока (рис. 3, а), можно судить об асимметрии струи, оценить размер пятна напыления и относительную скорость роста покрытия внутри нее.

Распределения скорости (рис. 3, б) и температуры (рис. 3, в) дают возможность увидеть динамический диапазон этих характеристик и сравнить масштабы изменения тепловых и кинетических показателей дисперсной фазы внутри струи. Пространственные зависимости характеристик дисперсной фазы напылительной струи отражают динамику движения и нагрева частиц.

Полученные результаты позволяют калибровать математические модели, описывающие процессы плазменно-дугового

напыления, оптимизировать дистанцию нанесения покрытий, производить перенос технологического режима на средства на-

пыления другого класса, а также оптимизировать режим работы установки и совершенствовать ее конструкцию.

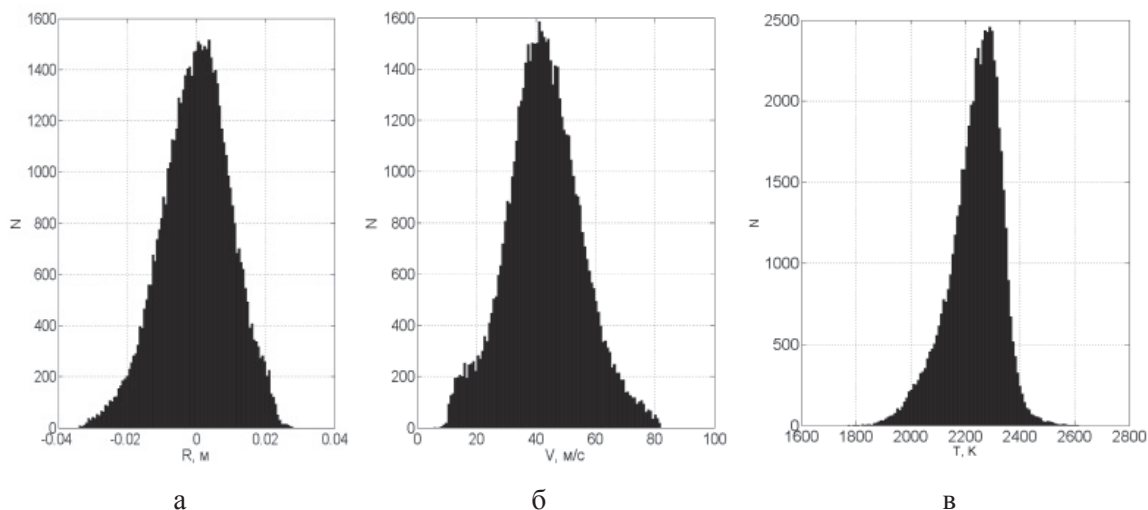


Рис. 3. Распределения параметров дисперсной фазы напылительной струи при использовании стальной проволоки диаметром 1,6 мм и тока дуги 220 А

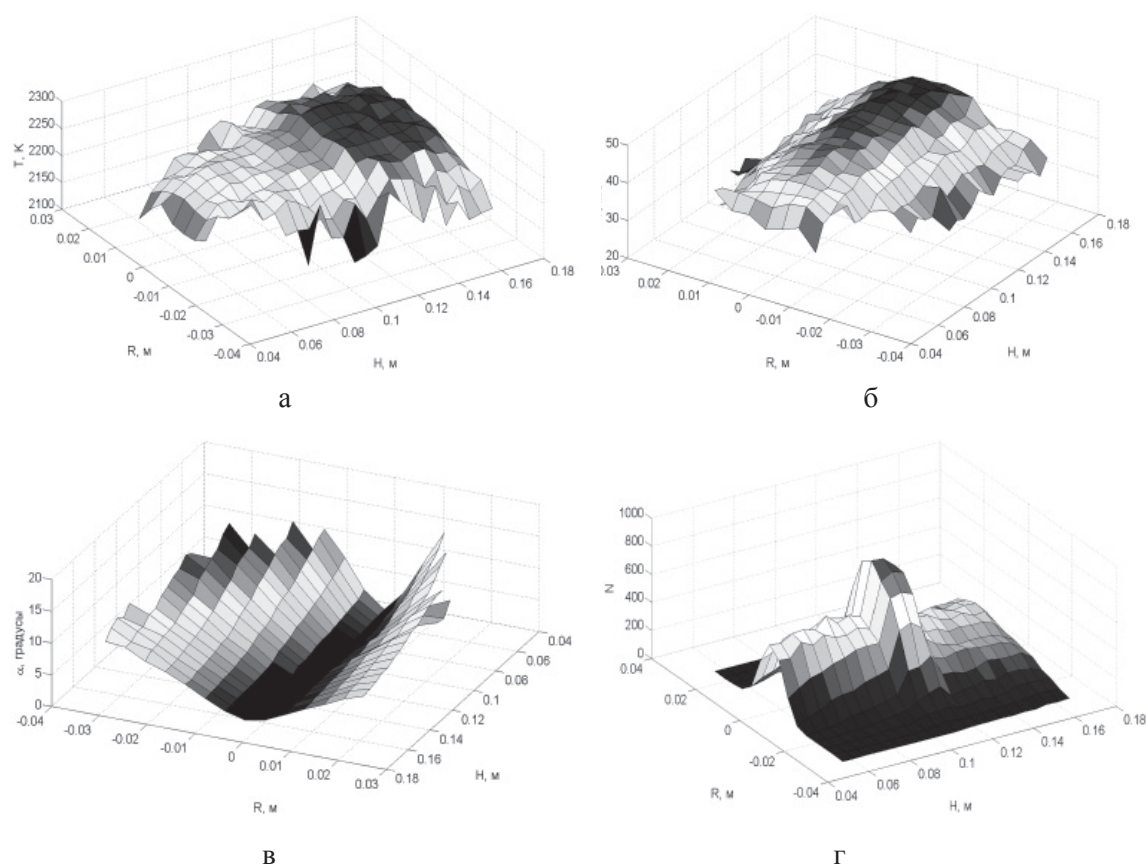


Рис. 4. Пространственные зависимости: а – температуры; б – скорости; в – направления движения; г – количества идентифицированных частиц дисперсной фазы в напылительной струе установки «Плазер» (диаметр стальной проволоки – 1,6 мм; ток дуги 220А)

Выводы

Создана система оптического контроля скорости и температуры дисперсной фазы в потоке газотермического напыления на базе камеры HD1-1312-1080-G2, спектрометра LR1-T и модуля обработки сигналов в среде MATLAB. Предложены модели измерения скорости и температуры напыляемых частиц по изображениям их треков. Предложен способ яркостной пирометрии подвижных объектов на основе калибровки по неподвижному температурному эталону. Погрешность определения скорости частиц составляет 1%, а погрешность определения температуры авторы оценивают на уровне 3%. Производительность анализа тепловизионных данных системой контроля составила 2200–2700 частиц в секунду. В результате исследования стационарного режима работы плазменно-дуговой установки «Плазер» получены распределения скорости и температуры частиц по объему напылительной струи. Система оптического контроля может быть применена для управления процессом напыления в режиме реального времени, оптимизации технологического режима и совершенствования напылительной установки.

Работа выполнена в рамках совместного проекта РФФИ (№ 14-08-90428) и НАН Украины (№ 06-08-14), а также при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (задание № 2014/505 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части) и гранта Югорского государственного университета.

Список литературы

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардаговская // Киев: Наукова думка. – 1987.
2. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Диагностика распределения температуры и скорости напыляемого порошка в импульсном плазменном потоке // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2007. – № 9. – С. 114.
3. Долматов А.В., Гуляев И.П., Имамов Р.Р. Спектральный пирометр для контроля температуры в процессах термосинтеза // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 32–42.
4. Долматов А.В., Ермаков К.А., Лавриков В.В., Маковеев А.О. Комплекс автоматизированной калибровки тепловизионной системы на базе MATLAB // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2 (25). – С. 59–63.
5. Бороненко М.П., Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Демьянов А.И., Долматов А.В., Иордан В.И., Коржик В.Н., Кривцун И.В., Харламов М.Ю. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления // Фундаментальные исследования. – 2013. – Т. 6. – № 10. – С. 1194–1199.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Гуляев И.П., Солоненко О.П., Смирнов А.В., Чесноков А.Е., Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Милокова И.В., Долматов А.В. Способ определения температурного распределения частиц конденсированной фазы в двухфазном плазменном потоке // Патент на изобретение RUS 2383873 12.11.2008.
10. Gulyaev I.P., Ermakov K.A., Gulyaev P.Yu. New high-speed combination of spectroscopic and brightness pyrometry for studying particles temperature distribution in plasma jets. European researcher. – 2014. – № 3–2 (71). – С. 564–570.
11. Kharlamov M.Yu., Krivtsun I.V., Korzhyk V.N., Dynamic Model of the Wire Dispersion Process in Plasma-Arc Spraying // J. Therm. Spray Technol. – 2014. – № 23 (3). – P. 420–430.

References

1. The thermal coatings from powder materials: a handbook / Yu.S. Borisov, M.Yu. Kharlamov, S. L. Sidorenko, E.N. Ardatovskaya. Kiev: Scientific thought. 1987.
2. Gulyaev P.Yu., Dolmatov A. V. Diagnostics of the spraying powders temperature and velocity in the pulse plasma flow // Russian Physics Journal. 2007. no. 9. pp. 114.
3. Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Imamov R.R. Spectral pyrometer for temperature control in thermosynthesis processes // Herald Ugra State university. 2014. no. 2(33). pp. 32–42.
4. Dolmatov A.V., Ermakov K.A., Lavrikov V.V., Makoveev A.O. Complex of the automated calibration by thermovision of system on the Matlab base // Herald Ugra State university. 2012. no. 2(25). pp. 59–63.
5. Methods of control of temperature and velocity of particles of the condensed phase in the process of plasma-arc spraying / Boronenko M.P., Gulyaev I.P., Gulyaev P.Y., Demyanov A.I., Dolmatov A.V., Jordan V.I., Korzhik V.N., Krivtsun I.V., Kharlamov M.Y. // Fundamental research. 2013. Vol. 6. no. 10. pp. 1194–1199.
6. 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.
7. 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.
8. New technique «Plazer» renovations of details for railroads / V.N. Korzhik, I.V. Krivtsun, S.V. Petrov, M.Yu. Kharlamov // Reconditioning, restoration, modernizing. 2009. no. 1. pp. 20–22.
9. Method for detection of temperature distribution of condensed phase particles in two-phase plasma flow / I.P. Gulyaev, O.P. Solonenko, A.V. Smirnov, A.E. Chesnokov, P.Yu. Gulyaev, V.I. Jordan, I.V. Milyukova, A.V. Dolmatov // Patent for invention RUS 2383873 12.11.2008.
10. Gulyaev I.P., Ermakov K.A., Gulyaev P.Y. New high-speed combination of spectroscopic and brightness pyrometry for studying particles temperature distribution in plasma jets. European researcher. 2014. no. 3–2 (71). pp. 564–570.
11. Kharlamov M.Y., Krivtsun I.V., Korzhyk V.N., Dynamic Model of the Wire Dispersion Process in Plasma-Arc Spraying. J. Therm. Spray Technol. 2014. 23 (3), pp. 420–430.

Рецензенты:

Мартынов С.И., д.ф.-м.н., профессор, директор Политехнического института, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск;

Платонов Н.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительства Политехнического института, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск.

Работа поступила в редакцию 18.11.2014.