

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ПОТОКА ЛАМИНАРНОГО ПЛАЗМОТРОНА С ПОСТОЯННОЙ ПОДАЧЕЙ ПОРОШКА

М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Л. Трифонов

Введение

Автоматизация технологических процессов плазменной обработки порошковых материалов и нанесения покрытий включает в себя задачу поддержания строго регламентированных термодинамических параметров состояния частиц конденсированной фазы в плазменном потоке при условии обеспечения максимальной производительности. Такой подход содержит хорошо известное противоречие между изменением теплового баланса в гетерогенном потоке при увеличении содержания конденсированной фазы [1]. Частички порошка при этом не только играют роль теплоотвода, но и тормозят поток транспортирующего газа [2], что, в конце концов, приводит к стратификации, и разрушению ламинарной структуры течения псевдогаза частиц, и даже появлению непроницаемой пробки агломератов. В результате вместо увеличения производительности установки газотермического напыления на практике часто имеет место явление «перегрузки» плазменной струи или дозатора порошка: возникновение кратковременной перебоев, понижение температуры и скорости частиц, изменение структурного и фазового состава покрытия [3] и уменьшение коэффициента выхода готовой продукции.

Постановка задачи исследования.

Очевидным решением противоречия между производительностью процесса плазменного напыления и стабильностью его термодинамических параметров является разработка экспериментальной методики диагностики [4] и нахождения таких режимов работы плазмотрона, на которых обеспечивается наивысшая пропускная способность газового потока при транспортировке порошка с заданной погонной плотностью. Таким образом, режим работы дозатора должен быть ограничен максимальной величиной расхода на каждом значении мощности плазмотрона. При большем расходе струя перегружается порошком и переходит в неустойчивый турбулентный режим. Зависимость производительности установки в $кг/с$ от погонной плотности потока частиц порошка в $кг/м$ часто называется фундаментальной диаграммой [5]. Нами предлагается как теоретическая модель описания данной характеристики, так и экспериментальная методика ее построения на основе данных высокоскоростной регистрации движения частиц в двухфазных гетерогенных потоках [6, 7].

Техника эксперимента

Изучение газодинамики движения двухфазного потока плазмотрона с постоянной подачей напыляемого порошка было проведено при помощи высокоскоростного микропирометрического комплекса измерения температуры и скорости распространения пламен, показанного на рис. 1.

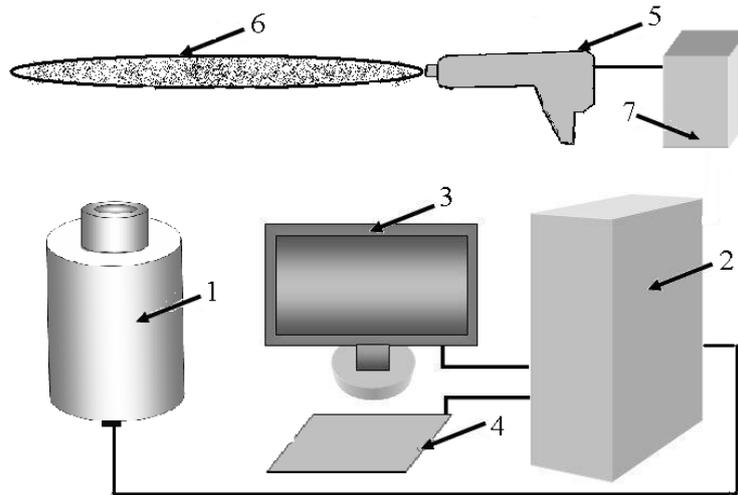


Рисунок 1. Контрольно-измерительного комплекс: 1 – высокоскоростная видеокамера ВидеоСпринт; 2 – управляющий компьютер; 3 – монитор; 4 – управляющая клавиатура; 5 – плазмотрон MEV-50; 6 – плазменный поток

Видеосигнал наблюдается на мониторе – 3, управление видеокамерой осуществляется с клавиатуры – 4. Излучение частиц потока – 6 плазмотрона – 5, подключённого к источнику питания – 7, регистрировалось через светофильтр. При скорости ввода кадров 1000 кадров в секунду видеофайлы были сняты на разных временах экспозиции.

Изучение процесса плазменного напыления актуально в связи с его многофакторностью и нелинейностью и осложнено малыми размерами объектов и высокими скоростями их движения и нагрева. Стробоскопические «трековые» методы измерения скорости потока частиц с помощью быстродействующих оптических затворов и телевизионных CCD-матриц высокого разрешения существенно расширяют возможности исследований в данной области.

Для формирования плазменной струи использовался плазмотрон с межэлектродными вставками номинальной мощности 50кВт (МЭВ 50). Канал плазмотрона оставался неизменным во всех экспериментах и имел следующий вид: МЭВ секция 7–7–7–8–9 мм, анод 9 мм, сопло 14 мм с расширением уступом до 26 мм. Рабочий (плазмообразующий) и транспортирующий газы во всех случаях – воздух. Инжекторы порошка имели внутренний диаметр 2 мм и располагались в уступе сопла (диаметр 26 мм). Для экспериментов использовался порошок диоксида циркония, стабилизированного иттрием (Yttria stabilized zirconia) SPM-2000-1 производства Sultzer Metco. Порошок получен методом распыления сушкой и последующего отжига.

Оптическое излучение частиц порошка, находящегося в плазменном потоке плазмотрона, через объектив высокоскоростной видеокамеры ВидеоСпринт попадает на светочувствительную область матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС), где происходит экспозиционное (от 20 нс до 20 мкс) накопление заряда (размер светочувствительной области – 15.3*12.3 мм, диагональ 19.67 мм; размер пикселя – 12*12 мкм). Затем происходит оцифровка данных аналого-цифровым преобразователем (АЦП) разрядностью 10 бит; и запись видеофайлов – 8 бит. После дискретизации и квантования сигнала в АЦП изображение в памяти видеокамеры представляет собой матрицу, каждый элемент которой является пикселем определённой яркости. Т. о., мы получаем изображение в виде пространственного распределения энергетической освещённости на плоскости в виде двумерных массивов точек.

Теоретическая модель фундаментальной диаграммы потока

Основной физической моделью, лежащей в основе интегральных времяпролетных методов контроля скорости, является представление движения двухфазного потока в виде движения двух взаимопроникающих континуумов газовой фазы и «псевдогаза» частиц конденсированной фазы [1], для которой справедливо уравнение непрерывности, описывающее движение потока ньютоновской жидкости (псевдогаза частиц), чувствительной к ударным волнам:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n \cdot \vec{v}) = 0,$$

где $n = \frac{N(t)}{V}$ – концентрация частиц в малом измерительном объеме $V = \Delta l \cdot S$, а величина S – поперечное сечение потока, Δl – толщина измерительного объема в направлении движения потока, \vec{v} – скорость потока «псевдогаза».

Введём обозначения:

$q(t, x) = Q(\rho) = \left(\frac{dn}{dt}\right) \cdot V$ – интенсивность потока частиц, пересекающих поперечное сечение измерительного объёма V , т. е. число частиц в единицу времени;

$\rho(t) = \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right) \cdot S = \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right) \cdot \frac{V}{\Delta l}$ – плотность частиц, т. е. число частиц на единицу длины.

Тогда уравнение непрерывности в одномерном виде запишется следующим образом:

$$q(t, x) = \rho \cdot v$$

Таким образом, появляется возможность найти интенсивность потока частиц, пересекающих поперечное сечение измерительного объема V , экспериментально определив среднюю скорость частиц в потоке и их погонную плотность.

Аналитическая оценка нагрева и ускорения частиц

Обработка видеофайлов, полученных в ходе эксперимента, осуществлялась в свободно распространяемой программе ImageJ. Для адекватной интерпретации полученных данных о длинах трека был сделан снимок линейки. Перед обработкой данных в программе ImageJ была произведена установка пространственной шкалы с помощью масштабного снимка. Численные значения скорости и построение графиков были получены в программе Origin 7 Pro. Ниже приведены характерные исходные и обработанные фото и движения частиц порошка в потоке плазмотрона.

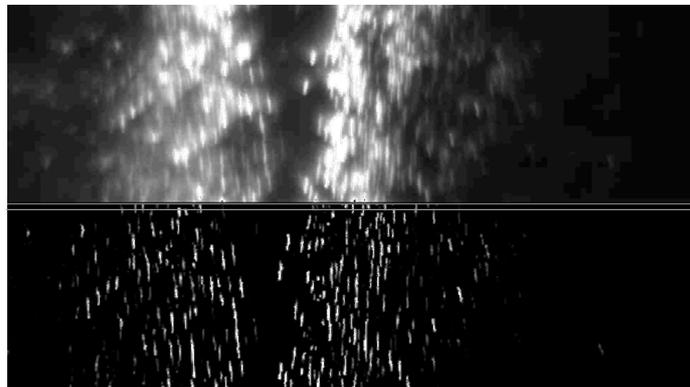


Рисунок 2. Характерные исходные и обработанные фото и движения частиц порошка в потоке плазмотрона

При обработке экспериментальных данных всё поле кадра делится на несколько областей, в каждой из которых и будет вестись подсчёт числа частиц и их расчёт скорости.

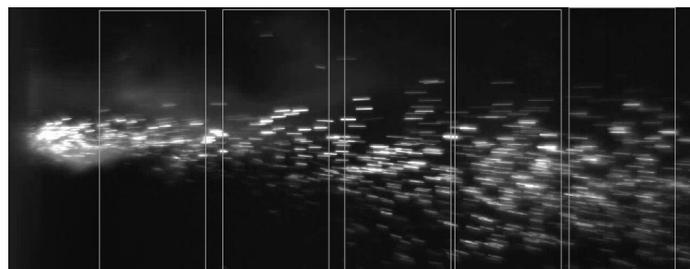


Рисунок 3. Области, выделенные для исследования

Для расчёта скорости времяпролётным методом [3] необходимо как можно точнее знать границы треков частиц порошка. Поэтому видеокادر предварительно подвергался значительной обработке: удалялась запылённость струи, выделялись границы треков. После, длину треков можно измерять либо «вручную», непосредственно на рабочем поле программы ImageJ, либо с помощью написанных макросов. Так же возможно измерить длину треков после представления изображения в виде изолиний.

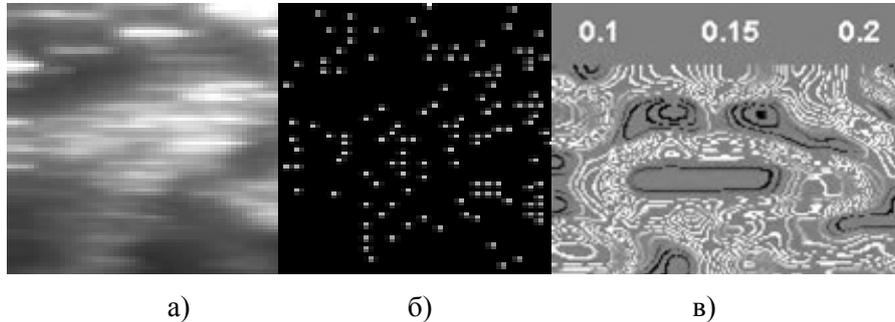


Рисунок 4. а) исходное изображение;
б) представление треков частиц в виде точек-максимумов;
в) представление трека частицы в виде изолиний

Для расчёта погонной плотности подсчёт числа частиц ведётся практически без предварительной обработки. При этом принимается, что количество частиц равно числу максимумов на изображении. При подготовке кадра к подсчёту максимумов нельзя допускать пикселизации изображения. Полученные результаты измерений, сохранённые в текстовом файле, переводятся в цифровой формат. Визуализируются все данные в виде графиков в программе Origin 7 Pro.

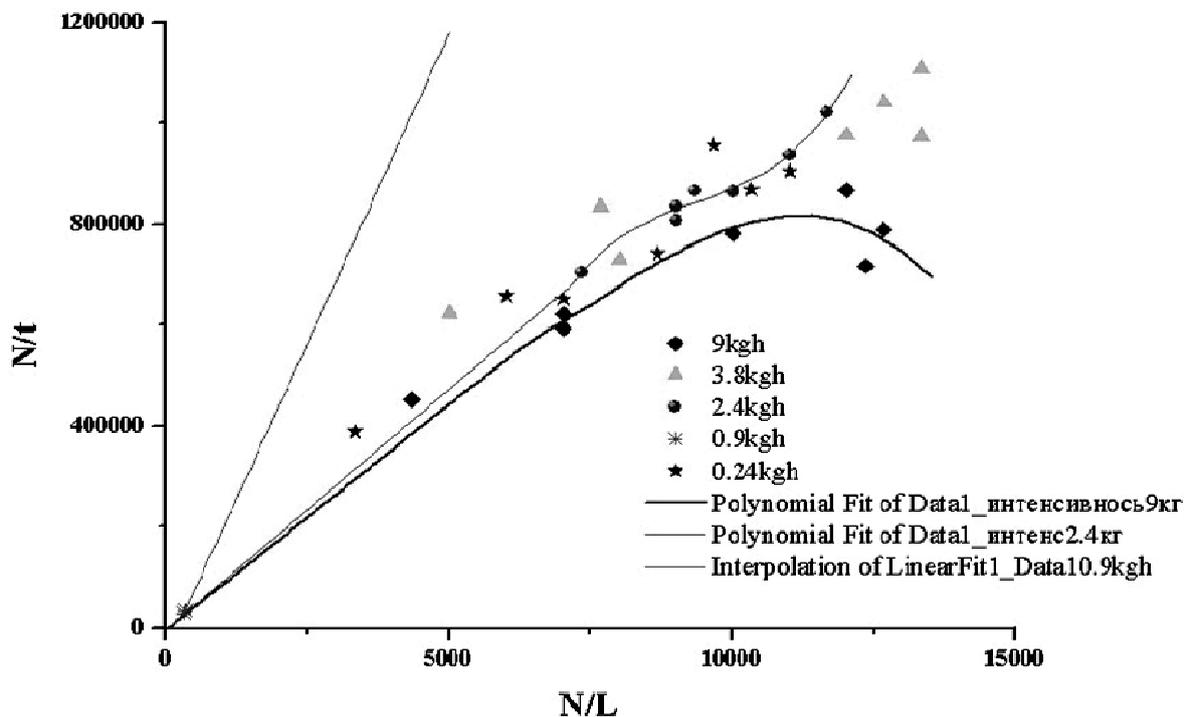


Рисунок 5. Семейство экспериментально определенных фундаментальных диаграмм для разных режимов мощности плазмотрона МЭВ-50

Поведение семейства фундаментальных диаграмм двухфазного потока плазмотрона явным образом показывает отличие нагрузочной характеристики слабо запыленных струй от перегруженных транспортируемым порошком. В последнем случае наблюдается максимум на диаграмме потока.

Заключение

Новый подход к диагностике двухфазных потоков, основанный на измерении ограниченного числа параметров, позволяет оценить величину интенсивности потока независимо от температуры и дисперсионного состава. Такой метод диагностики более полезно использовать не только для исследования двухфазных потоков, но и как индикатор технологического режима работы установки, т. е. для определения предельной пропускной способности и перехода в неустойчивые режимы напыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред [Текст] / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 464 с.
2. Гуляев, П. Ю. Диагностика распределения температуры и скорости напыляемого порошка в импульсном плазменном потоке [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // Известия высших учебных заведений. – Физика, 2007. – № 9, Приложение. – С. 114–117.
3. Гуляев, П. Ю. Структурно-фазовые изменения в порошковых СВС-материалах при плазменном нанесении покрытий [Текст] / П. Ю. Гуляев, И. В. Милукова, О. П. Солоненко, И. П. Гуляев // Известия высших учебных заведений. – Физика, 2007. – № 9, Приложение. – С. 349–352.
4. Gulyaev, I. P. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface [Text] / I. P. Gulyaev, O. P. Solonenko, P. Y. Gulyaev, A. V. Smirnov // Technical Physics Letters, 2009. – Т. 35, № 10. – С. 885–888.
5. Гуляев, П. Ю. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц [Текст] / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. П. Гуляев, А. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. – Физика, 2008, Т. 51, № 9–3. – С. 79–87.
6. Гуляев, И. П. Трековый анализ скорости частиц и определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазмотрона [Текст] / И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // Ползуновский альманах, 2008. – № 2. – С. 13–14.
7. Гуляев, П. Ю., Долматов А.В., Диагностика распределения частиц по температурам в технологии плазменного напыления [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов // Ползуновский альманах, 2010. – № 2. – С. 71–73.