

ДИАГНОСТИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО ТЕМПЕРАТУРАМ В ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. В. Долматов, П. Ю. Гуляев, М. П. Бороненко

Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

В технологиях нанесения защитных покрытий плазменным потоком прочность сцепления порошка с основой определяется степенью прогрева частиц порошка до температуры плавления без перехода основной их массы в жидкую фазу. Нагрев частиц порошка является результатом вынужденного конвективного теплообмена с плазменным потоком. Поэтому определение температуры частиц непосредственно перед моментом взаимодействия с основой представляет важную технологическую задачу.

Дисперсность порошка и неоднородность условий внедрения и движения отдельных частиц в плазменном потоке приводит к разнородному их нагреву перед контактом с основой. Анализ распределения температуры частиц конденсированной фазы в плазменном потоке с помощью известных методов оптической анемометрии [1] требует значительного времени и не может использоваться для контроля технологических параметров в процессе нанесения покрытия.

Целью настоящей статьи является разработка виртуальной информационно-измерительной системы экспресс-диагностики распределения температуры частиц конденсированной фазы в плазменном потоке.

Методика определения температуры частиц в потоке напыления включает измерение интенсивности излучения при разложении в спектр. При этом во время измерения производят суммирование спектральных интенсивностей на N длинах волн от пролетающих разнородно нагретых частиц конденсированной фазы. Получается суммарный тепловой спектр U от разнородно нагретых частиц, который является вектором значений $U(l_1), U(l_2), \dots, U(l_i), \dots, U(l_N)$, где $U(l_i)$ есть суммарная спектральная интенсивность, полученная на длине волны l_i . Гистограмма Z температурного распределения частиц, которая представляет собой вектор значений на N заданных температурах, определяют по следующей формуле:

$$Z = A^{-1} \cdot U, \quad (1)$$

где A – матрица размером $N \times N$ значений $\|a(l_i, T_j)\|$ спектральной интенсивности излучения абсолютно черного тела, определяемых по формуле Планка на каждой из N длин волн и каждой из N заданных температур.

Среднюю температуру частиц находят по формуле:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N Z(T_i) \cdot T_i}{\sum_{i=1}^N Z(T_i)}, \quad (2)$$

где T_{cp} – имеет вполне определенный физический смысл только для одномодовых распределений частиц $Z(T_j)$ или может быть вычислена для совокупности нескольких локальных температурных распределений частиц [2, 3].

В технологиях плазменного нанесения покрытий газовая фаза используется для транспортировки частиц конденсированной фазы к подложке. При этом газовая фаза обладает значительной температурой и имеет линейчатый спектр собственного излучения (рисунок 1), в который входят линии излучения транспортирующего газа и незначительные следы линий излучения-поглощения испарившихся в процессе переноса мелких частиц порошка.

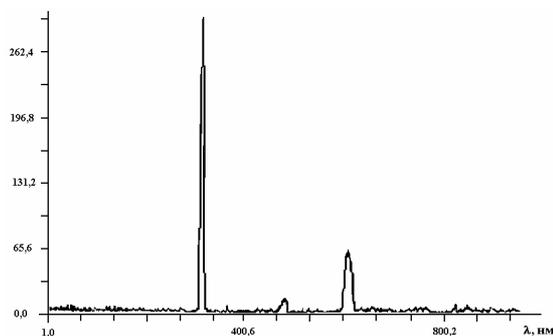


Рисунок 1 – Спектр собственного излучения газовой фазы плазменного потока

Все нагретые частицы конденсированной фазы имеют непрерывный спектр собственного теплового излучения. В результи-

рующем спектре U суммируются интенсивности излучения непрерывного теплового и линейчатого спектров (рисунок 2), что делает невозможным определение точного температурного распределения Z по формуле (1) напрямую, с использованием формулы Планка для получения матрицы A .

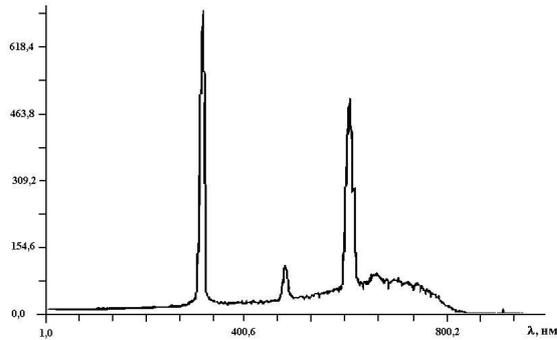


Рисунок 2 – Спектр излучения двухфазного плазменного потока

Поставленная задача достигается благодаря тому, что в заданном сечении дважды производится измерение интенсивности спектральных линий излучения плазменного потока, сначала без частиц конденсированной фазы в виде вектора значений $S(l_1), S(l_2), \dots, S(l_i), \dots, S(l_N)$, а потом суммарного теплового и линейчатого спектра двухфазного плазменного потока U , из которого затем исключаются все значения на тех длинах волн l_k , где интенсивность спектральных линий плазмы $S(l_k)$ не равна нулю, а из матрицы A , полученной по формуле Планка, исключаются соответствующие столбцы и строки с элементами $\|a(l_i, T_j)\|$, где i и j равны k .

Затем температурное распределение находится по формуле (1), а средняя температура частиц конденсированной фазы по формуле (2).

Виртуальная информационно-измерительная система (рисунок 3) содержит оптическую систему 1, которая проецирует изображение сечения 2 двухфазного плазменного потока 3 в плоскость входной щели 4 спектрального дисперсионного устройства 5, на выходе которого в фокальной плоскости расположен многоэлементный линейный фотоприемник 6, работающий в режиме накопления заряда. Фотоприемник 6 состоит из набора N фотодиодов и схемы опроса, которая подает электрические сигналы с фотодиодов на вход аналого-цифрового преобразователя 7. Цифровой выход преобразователя 7 через

переключатель режимов 8 передает полученный спектр либо на вход П1 блока выделения спектральных линий фона 9 (на первом этапе измерения интенсивности спектральных линий излучения плазменного потока без частиц конденсированной фазы), либо на вход П2 блока цифровой обработки сигналов 10 (на втором этапе измерения суммарного теплового и линейчатого спектра двухфазного плазменного потока). Выход блока выделения спектральных линий фона 9 передает на вход П3 блока цифровой обработки 10 номера длин волн, интенсивность которых в спектре плазменного потока без частиц конденсированной фазы не равна нулю. На выходе блока цифровой обработки сигналов 10, после исключения из суммарного спектра двухфазного потока и матрицы A значений с номерами совпадающими с номерами длин волн на выходе блока 9, формируется гистограмма Z температурного распределения частиц 11 согласно формуле (1) и после этого определяется средняя температура частиц конденсированной фазы по формуле (2).

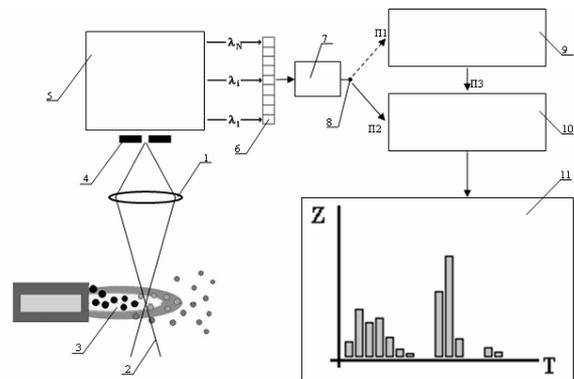


Рисунок 3 – Схема виртуальной информационно-измерительной системы диагностики распределения частиц по температурам в плазменном потоке

Система работает следующим образом. Излучение запыленного плазменного потока 3, генерируемого плазмотроном и движущегося поперечно относительно заданного сечения 2 (где положение сечения 1 задается положением оптической системы 1 и входной щелью 4 спектрального дисперсионного устройства 5), проходит через оптическую систему 1 и проецируется на входную щель 4 спектрального дисперсионного устройства 5, которое пространственно разделяет прошедшее через входную щель излучение по N длинам волн. Полученное на N длинах

ДИАГНОСТИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО ТЕМПЕРАТУРАМ В ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

волн изображение входной щели проецируется в фокальную плоскость, где находится многоэлементный фотоприемник 6, N фотодиодов которого работают в режиме накопления заряда. На каждом отдельно взятом фотодиоде фотоприемника происходит преобразование падающего излучения в электрический сигнал, и на всех фотодиодах производится параллельное одновременное накопление электрического сигнала в течении времени регистрации $t_{рег}$, что позволяет суммировать все мгновенные спектры излучения двухфазного потока в сечении 2. После времени накопления заряда $t_{рег}$ схема опроса фотоприемника передает электрические сигналы с фотодиодов на аналого-цифровой преобразователь 7, а он переводит их в цифровую форму. На первом этапе измерений - в режиме «холостого хода» плазмотрона, измеряют спектр излучения плазменного потока без частиц конденсированной фазы в виде вектора значений $S(l_1), S(l_2), \dots, S(l_i), \dots, S(l_N)$, которые с выхода преобразователя 7 через переключатель режимов 8 поступают на вход П1 блока выделения спектральных линий фона 9, где каждый элемент из вектора значений $S(l_1), S(l_2), \dots, S(l_i), \dots, S(l_N)$ сравнивают с заранее известным пороговым значением «темного» сигнала фотоприемника и определяют набор значений номеров k , содержащей номера k_1, k_2, \dots, k_M тех длин волн l_k , где интенсивность спектральных линий плазмы $S(l_k)$ не равна нулю. Полученный набор значений номеров k с выхода блока выделения спектральных линий фона 9 поступает на вход П3 блока цифровой обработки сигналов 10, где из матрицы A исключают соответствующие столбцы и строки с элементами $\|a(l_i, T_j)\|$, где i или j равны одному из значений в наборе k . При этом размер матрицы A уменьшается с $N \times N$ до $(N - M) \times (N - M)$. На втором этапе измерений - в номинальном режиме работы, (когда в плазменный поток инжектируются частицы конденсированной фазы) измеряют суммарный спектр двухфазного плазменного потока U , в виде вектора значений $U(l_1), U(l_2), \dots, U(l_i), \dots, U(l_N)$, выходные данные преобразователя 7 через переключатель режимов 8 поступают на вход П2 блока цифровой обработки сигналов 10, где исключают

все значения $U(l_k)$ на тех длинах волн l_k , где интенсивность спектральных линий плазмы $S(l_k)$ не равна нулю. При этом размер вектора значений $U(l_1), U(l_2), \dots, U(l_i), \dots, U(l_N)$ уменьшается с N элементов до $(N - M)$ элементов. Затем на основе преобразованных значений вектора U' и матрицы A' в блоке цифровой обработки сигналов 10 определяют гистограмму Z температурного распределения частиц 11 конденсированной фазы двухфазного потока и среднюю температура частиц $T_{ср}$ с помощью формул (1) и (2) соответственно [4].

Выводы.

Предложенный способ диагностики распределения частиц по температурам в плазменном потоке обладает повышенной помехозащищенностью и высокой точностью измерения температурного распределения частиц конденсированной фазы двухфазного плазменного потока за счет исключения из суммарного теплового спектра излучения плазменного потока линий спектра газовой фазы, а также расширяет технологические возможности за счет того, что температурное распределение частиц можно определять в плазменных струях с любым химическим составом плазмообразующего газа, при малой концентрации частиц твердой фазы и большой светимости плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы лазерной доплеровской анемометрии/ Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С.// М.: Наука, 1982. – 303 с.
2. Долматов А. В. Автоматизация контроля теплотехнических параметров в технологиях детонационного напыления/ Долматов А.В., Гуляев П.Ю.// Системы управления и информационные технологии, 2009, №1.2 (35). – С. 230 – 233.
3. Долматов А. В. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления/ Долматов А. В., Гуляев П. Ю.// Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2009, т. 11, №5(2). - С. 382-385.
4. Долматов А. В. Способ определения температурного распределения частиц конденсированной фазы в двухфазном плазменном потоке/ Долматов А.В., Гуляев П. Ю., Гуляев И.П., Солоненко О.П., Смирнов А.В., Чесноков А.Е., Иордан В.И., Милюкова И.В.// Патент РФ № 2383873 на изобретение. - Приоритет от 12.11.2008. – Опубликовано 10.03.2010 в бюлл. И. №7.