

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ДИАГНОСТИКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

© 2009 П.Ю. Гуляев, А.В. Долматов

Югорский государственный университет

Поступила в редакцию 21.11.2009

Представлена физическая модель двухфазного плазменного потока в виде потока псевдогаза частиц, чувствительного к ударным волнам. Разработана методика интегральной диагностики распределения частиц по скорости и температуре в импульсном плазменном потоке. Приведен пример практической реализации диагностической системы для технологии детонационного напыления.

Ключевые слова: физическая модель, плазменное напыление, технология, диагностика, распределение, скорость, температура

Одним из способов нанесения покрытий и конструирования функционально-градиентных материалов является плазменное напыление. Прочность сцепления между слоями и основой в технологиях напыления в наибольшей степени зависит от температуры и скорости частиц, транспортируемых плазменным потоком. В технологии детонационного напыления импульсное воздействие низкотемпературной плазмы образует ансамбль частиц, направленный на подложку и характеризующийся распределениями скорости и температуры. Диагностика этих распределений позволяет контролировать качество покрытия или материала в процессе его формирования. Быстротечность и термодинамическая нестационарность импульсных плазменных потоков затрудняет проведение диагностики скорости и температуры как традиционными зондовыми и контактными методами, так и бесконтактными оптическими методами лазерной анемометрии и пирометрии [1, 2] из-за сильного влияния рефракции в высокотемпературных зонах потока и турбулентных завихрений на границах скачка давления. Системы интегральной оптической диагностики дисперсно-фазных сред основаны на регистрации интегрального излучения от всего ансамбля частиц в двухфазном потоке, и поэтому рефракционные явления не оказывают на них существенного влияния, но требуется разработка методик оценки распределений скорости и температуры в пределах измерительного объема.

Основной физической моделью, лежащей в основе интегральных времяпролетных

методов диагностики скорости, является уравнение непрерывности, описывающее движение потока ньютоновской жидкости (псевдогаза частиц), чувствительной к ударным волнам: $\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n\vec{v}) = 0$, где $n=N(t)/V$ – концентрация частиц в измерительном объеме V .

Введем обозначения: $\mu(t) = -(\partial n / \partial t) \cdot V$ – интенсивность потока частиц, пересекающих поперечное сечение измерительного объема V (число частиц в единицу времени); $\rho_{noz}(t) = (\partial n / \partial x) \cdot S = (\partial n / \partial x) \cdot V / \Delta l$ – погонная плотность частиц, приведенная к толщине измерительного объема Δl , число частиц на единицу длины. Запишем уравнение непрерывности в одномерном виде: $\mu(t) = \rho_{noz} v$. Отсюда определим скорость потока:

$$v = \mu / \rho_{noz} \quad (1)$$

Интегральная скоростная характеристика (1) выражает скорость ансамбля или группы из N частиц, находящихся в определенный момент времени в измерительном объеме. Это позволяет перейти к модели многоскоростного твердофазного континуума. Континууму с номером i соответствует плотность ρ_i , скорость v_i , ($i=1, 2, \dots, K$) и другие параметры.

Методика диагностики скоростных характеристик двухфазного потока заключается в последовательном выделении оптическими средствами теплового излучения одинаковых порций частиц потока, описываемых как континуумы, измерении времени пролета каждым континуумом известного базового расстояния, задаваемого несколькими фотоприемниками. В качестве оптического преобразователя, в общем случае должна применяться линейная многоэлементная матрица из M фотодиодов. Интенсивность потока частиц определяют по

Гуляев Павел Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры физики и общетехнических дисциплин. E-mail: P_Gulyaev@ugrasu.ru

Долматов Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта. E-mail: ADolmatov@bk.ru

интенсивности светового излучения, а плотность потока частиц – по разности интенсивностей входящего и выходящего потока частиц в сечениях, задающих базовое расстояние пролета L (рис. 1).

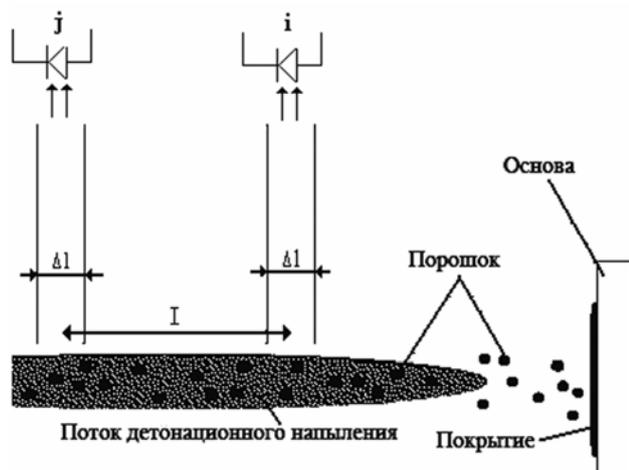


Рис. 1. Схема диагностики распределения скорости частиц конденсированной фазы в потоке плазмы

Количество частиц в i -ом сечении в некоторый момент времени t может быть найдено как произведение погонной плотности $\rho_{\text{пог}}$ на этом участке на ширину сечения Δl :

$$N_i(t) = \rho_i(t) \Delta l.$$

Введем понятие средней погонной плотности частиц, как отношение разности числа частиц $N_{\text{вх}j}(t)$, вошедших через j -ое сечение и числа частиц $N_{\text{вых}i}(t)$ вышедших через i -ое, к расстоянию L между ними:

$$\langle \rho(t) \rangle = \frac{N_{\text{вх}j}(t) - N_{\text{вых}i}(t)}{L} = \frac{\langle N_{ji}(t) \rangle}{L}. \quad (2)$$

Запишем уравнение непрерывности для одномерного случая:

$$\frac{d\langle \rho_{\text{пог}}(t) \rangle}{dt} = - \frac{d\langle \mu(t) \rangle}{dx}. \quad (3)$$

Из (3) изменение средней интенсивности $d\langle \mu(t) \rangle$ в сечении L за период квантования сигнала $\Delta t_{\text{кв}}$ будет равно (без учета знака):

$$d\langle \mu(t) \rangle = d\langle \rho_{\text{пог}}(t) \rangle \frac{L}{\Delta t_{\text{кв}}}, \quad (4)$$

а с учетом (2), получим:

$$d\left(\frac{\langle N_{ji}(t) \rangle}{L}\right) \frac{L}{\Delta t_{\text{кв}}} = \frac{d(\langle N_{ji}(t) \rangle)}{\Delta t_{\text{кв}}}.$$

Число частиц, вошедших в j -ое сечение к моменту времени t , есть сумма числа частиц $N_j(t)$, входящих в сечение j за время dt , по рассматриваемому временному отрезку, то же справедливо и для числа частиц $N_i(t)$, вышедших за время t через сечение i .

$$N_{\text{вх}j}(t) = \frac{1}{K_0 \varepsilon_0(T)} \int_0^t J_j(\tau) d\tau$$

$$N_{\text{вых}i}(t) = \frac{1}{K_0 \varepsilon_0(T)} \int_0^t J_i(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $J_j(t)$ и $J_i(t)$ сигналы фототока, снимаемые с j -го и i -го фотодиодов соответственно. На основе (3), (4) и (5) получим:

$$\langle \mu(t) \rangle = \frac{1}{\Delta t_{\text{кв}} K_0 \varepsilon_0(T)} \int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau \quad (6)$$

Перепишем выражение (1) с учетом (3) и (6):

$$\bar{v} = \frac{1}{\Delta t_{\text{кв}} K_0 \varepsilon_0(T)} \frac{\int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau}{\left(\frac{\langle N_{ji}(t) \rangle}{L}\right)}. \quad (7)$$

Допустим, что изменением погонной плотности $\rho_{\text{пог}}$ между сечениями i и j можно пренебречь (меняется незначительно на выбранном интервале), тогда:

$$\langle \rho_{\text{пог}}(t) \rangle = \frac{\langle N_{ji}(t) \rangle}{L} \approx \frac{N_j(t)}{\Delta l} \approx \frac{N_i(t)}{\Delta l}. \quad (8)$$

Окончательно, для скоростей потока в сечениях i и j , выражая $N(t)$ из (4) и проводя некоторые упрощения, получим следующие соотношения:

$$v_i = \frac{\Delta l}{\Delta t_{\text{кв}}} \frac{\int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau}{J_i(t)};$$

$$v_j = \frac{\Delta l}{\Delta t_{\text{кв}}} \frac{\int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau}{J_j(t)}. \quad (9)$$

Максимальная прочность сцепления порошка с основой при напылении определяется степенью прогрева частиц порошка до температуры плавления без перехода основной массы частиц в жидкую фазу. Нагрев частиц порошка является результатом вынужденного конвективного теплообмена с импульсным плазменным потоком. Поэтому определение температуры частиц непосредственно перед моментом взаимодействия с основой представляет важную технологическую задачу.

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:

$$Z = A^{-1} \cdot U, \quad (10)$$

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:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N Z(T_i) \cdot T_i}{\sum_{i=1}^N Z(T_i)}, \quad (11)$$

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

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, в который входят линии излучения транспортирующего газа и незначительные следы линий излучения-поглощения испарившихся в процессе переноса мелких частиц порошка. Все нагретые частицы конденсированной фазы имеют непрерывный спектр собственного теплового

излучения. В результирующем спектре U суммируются интенсивности излучения непрерывного теплового и линейчатого спектров, что делает невозможным определение точного температурного распределения Z по формуле (10) напрямую, с использованием формулы Планка для получения матрицы A .

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 (рис. 2). Затем температурное распределение находится по формуле (10), а средняя температура частиц конденсированной фазы по формуле (11).

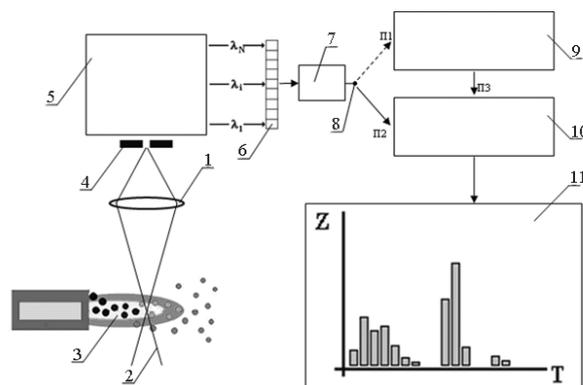


Рис. 2. Схема диагностики температурного распределения частиц конденсированной фазы в потоке плазмы:

1 – оптическая система; 2 – изображение сечения плазменного потока; 3 – двухфазный плазменный поток; 4 – входная щель спектрального дисперсионного устройства; 5 – спектральное дисперсионное устройство; 6 – фотоприемник из N элементов; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – переключатель режимов; 9 – блок выделения спектральных линий; 10 – блок цифровой обработки сигналов; 11 – гистограмма температурного распределения частиц)

Методика диагностики распределения скорости и температуры потока детонационного напыления реализована авторами в компьютерной автоматизированной системе ИСТ 2.4 [3]. Аппаратная часть системы состоит из светоприемников, которые расположены у среза ствола установки напыления. Они соединены оптическим волокнами с блоком

оптоэлектронных преобразователей (ОЭП). Сигнал с блока ОЭП поступает на плату аналого-цифрового преобразования (АЦП), встроенную в компьютер посредством шины PCI. Работа АЦП и программной части диагностического комплекса синхронизована с установкой детонационного напыления.



Рис. 3. Распределения скорости, относительной массы и импульса порошка в потоке за один цикл напыления

Автоматизированная система диагностики ИСТ 2.4 апробирована на установке детонационного нанесения покрытий «Катунь-М» [4]. В результате исследований удалось восстановить в каждом цикле напыления распределение средней по ансамблю скорости частиц с минимальной массовой долей ансамбля до 0,1%, что дало возможность анализировать параметры напыляемого порошка в различных частях потока детонационного напыления (рис. 3). Кроме того, эксперименты показали, что программно-аппаратный комплекс ИСТ

4.2 при частоте работы установки напыления 8-10 Гц может осуществлять диагностику параметров конденсированной фазы потока в режиме реального времени и пригоден для работы в автоматизированных системах технологического контроля за процессом нанесения покрытий. Погрешность измерения скорости диагностической системой ИСТ 2.4 составляет 5%, а температуры 10%.

Выводы: методика измерения теплофизических параметров потока детонационного напыления, изложенная в данной статье, позволила создать способ диагностики распределения температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе нанесения покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Овсянников, А.А. Диагностика низкотемпературной плазмы / А.А. Овсянников, В.С. Энгельшт, Ю.А. Лебедев и др. – Новосибирск: «Наука», 1994. – 485 с.
2. Засименко, В.М. Методы и средства оптической пирометрии / В.М. Засименко, В.И. Лах, Г.П. Самченко, С.П. Фуртак. – М.: Наука, 1983. – С. 43.
3. Евстигнеев, В.В. Оптоэлектронный диагностический комплекс для контроля скорости конденсированной фазы импульсного потока в установках детонационно-газового напыления / В.В. Евстигнеев, П.Ю. Гуляев, М.А. Гумиров и др. – Волгоград: РПК «Политехник», 2004. – С. 109-111.
4. Гуляев, П.Ю. Автоматизация контроля теплофизических параметров в технологиях детонационного напыления / П.Ю. Гуляев, А.В. Долматов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. - № 1.2(35). – С. 230-233.

PHYSICAL PRINCIPLES OF DIAGNOSTICS IN TECHNOLOGIES OF THE PLASMA SPRAYING

© 2009 P.Yu. Gulyaev, A.V. Dolmatov

Yugorsky State University

Physical model is introduced, presenting a two-phase plasma flow as a flow of pseudo-gas particles in which shock waves can propagate. Methods of integral diagnostics of particles velocity and temperature distributions in an impulse plasma flow are developed. Example of practical realization of diagnostic system for detonation spraying is given.

Key words: *physical model, plasma spraying, technology, diagnostics, distribution, velocity, temperature*

Pavel Gulyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Physics and Technical Disciplines.

E-mail: P_Gulyaev@ugrasu.ru

Aleksey Dolmatov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automobile Transport.

E-mail: ADolmatov@bk.ru