

ВЫДЕЛЕНИЕ КОНТУРОВ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ

М.П. Бороненко, П.Ю. Гуляев, А.А. Иванов, И.Ю. Пермяков

Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

Рассмотрены вопросы методики выделения на изображении контуров частиц конденсированной фазы при плазменном напылении. Приведены примеры компьютерной обработки экспериментальных данных. Обнаружено влияние шумов изображения на точность вычисления контура движущейся частицы в плазменном потоке.

Ключевые слова: плазменное напыление, выделение контуров, отношение сигнал/шум, высокоскоростная съемка.

Введение

Одним из ведущих методов газотермического напыления является плазменное напыление покрытий. Широкому распространению метода в промышленности способствуют высокое качество плазменных покрытий, значительная производительность, низкая себестоимость, простота технологии и широкий спектр процессов обработки высокотемпературной керамики [1]. В то же время требования к качеству покрытий постоянно возрастают, большое значение приобретают такие факторы, как воспроизводимость показателей качества напыляемых покрытий, стабильность процесса. Исходя из физических представлений процесса плазменного напыления, можно сделать вывод о том, что качество напыляемых покрытий во многом зависит от скорости и температуры распыляемых в плазменной струе частиц порошков. В момент соударения с подложкой частицы должны быть нагреты до температуры плавления и иметь максимально высокую скорость. [2]. Для выбора оптимальных условий плазменного напыления необходим непрерывный контроль нагрева и ускорения частиц порошка, а для этого, прежде всего, требуется построение качественной математической модели. Поэтому в настоящее время ведутся активные исследования в области создания систем автоматического контроля и управления температурой и скоростью напыляемых частиц [3]. Процесс осуществления контроля ключевых теплофизических параметров отдельных частиц конденсированной фазы с помощью телевизионных измерительных

систем наносекундного разрешения осложняется высокой запыленностью потока. Таким образом, необходима разработка методики распознавания контуров частиц в запыленных плазменных потоках.

Целью исследований является выбор и разработка методики распознавания контуров частиц в запыленных плазменных потоках, позволяющих с достаточной точностью регистрировать кинетику нагревания и движения отдельных частиц в процессе плазменного напыления.

Экспериментальная установка

Изображение напыляемых частиц получается путем регистрации их теплового излучения высокоскоростной видеокамерой. Для использования видеокамеры в качестве измерительной системы была проведена калибровка по эталонной температурной лампе ТРУ1100-2350 [4, 5]. Излучение попадает на светочувствительную область матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС), где происходит экспозиционное (от 2 мкс и больше) накопление заряда. Размер светочувствительной области - 15.3*12.3мм, диагональ 19.67мм; размер пикселя - 12*12мкм. Сигнал ПЗС считывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) разрядностью 10 бит; и записываются в видеофайлы с разрядностью 8 бит.



Рисунок 1 – Экспериментальный стенд

После дискретизации и квантования сигнала в АЦП изображение в памяти видеокамеры представляет собой цифровую матрицу, каждый элемент которой является значением яркости пикселя [6]. Обработка видеофайлов, полученных в ходе эксперимента, осуществлялась в свободно распространяемой программе *ImageJ*. Численные значения скорости и построение графиков были получены в программе *Origin 7 Pro*.

Выделение контуров частиц

Выделение объектов на изображении— это одна из характерных задач обработки изображений. Выделение контуров всегда основывается на дифференцировании в той или иной форме. В дискретных изображениях дифференцирование заменяется дискретными разностями, которые только аппроксимируют дифференцирование. Ошибки, связанные с этими аппроксимациями вызывают серьезные эффекты. Двумя самыми серьезными ошибками являются: анизотропное выделение контуров, т.е. контуры не выделяются одинаково хорошо во всех направлениях, и ошибочное оценивание направления контуров. Анализ подобных ошибок требует отдельного рассмотрения. Еще одним важным вопросом является надежность оценок контуров.

Таким образом, нам нужна мера, определяющая границы контура. Такой мерой может служить отношение сигнал/шум. Оценка этого соотношения производится по изображениям светящегося объекта с известными размерами и температурой. В поле зрения видеокамеры находится область визирования светящейся вольфрамовой ленты лампы, ширина ленты 2,8 мм. При изменении тока, проходящего через нить

накала, на фоточувствительную площадку попадает излучение разной интенсивности. Экспериментальное исследование отношения сигнал/шум, характерное для используемой телевизионной измерительной системы, получено при регистрации излучения эталонной лампы ТРУ-2350 при разных значениях температуры нити накала лампы [7]. При этом соотношение сигнал/фон так же разное. Считается, что пиксель, имеющий соотношение сигнал/фон ниже порогового не принадлежит контуру.

Выделение контуров [8] с помощью дифференциальных операторов первого порядка означает поиск самых резких изменений, т.е. максимумов модуля градиентного вектора. Следовательно, нужно вычислить первые частные производные по всем направлениям.

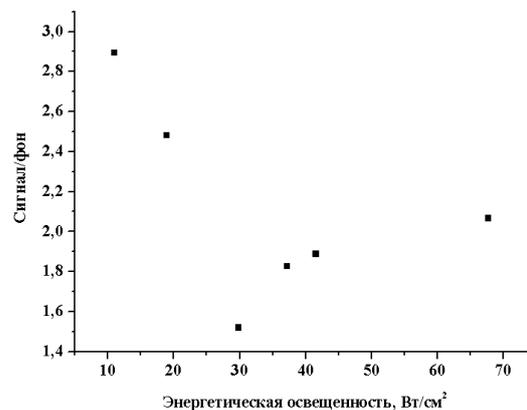


Рисунок 2 – Соотношение сигнал/фон для разной облученности объектива эталонной лампой ТРУ1100-2350

В операторной форме записи градиент можно записать как векторный оператор. В 2-D и 3-D пространстве получаем

$$D = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad D = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}.$$

Поскольку градиент является вектором, его модуль инвариантен относительно поворота системы координат. Это является необходимым условием для изотропного выделения контуров [8]. Вычисление модуля градиента можно выразить в 2-D пространстве с помощью операторного уравнения

$$|D| = [D_x \cdot D_x + D_y \cdot D_y]^{1/2}.$$

Вычисление модуля градиента эффективно выполняется как бинарный

точечный оператор с помощью таблицы преобразования.

На практике выделение контуров напыляемых частиц осуществляется в программе *ImageJ* путем применения разработанной методики, основанной на использовании стандартных функций включенных в библиотеку данной программы. Если для выделения контуров использовать градиентный метод, то контуры получаются путем пересечения нулевого уровня во вторых производных.

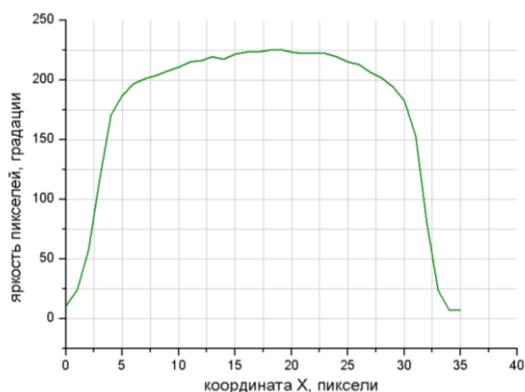


Рисунок 3 – Профиль яркости частицы

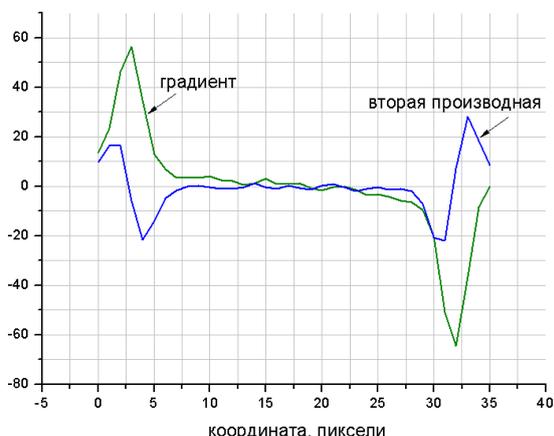


Рисунок 4 – Градиент яркости частицы

Следовательно, вторые производные по всем направлениям можно просто сложить для образования линейного изотропного контурного детектора, известного как оператор Лапласа. Очевидно, что не каждый переход через нулевой уровень соответствует контуру. Только пики до и после нуля, которые значительно выше уровня шума, указывают на действительные контуры.

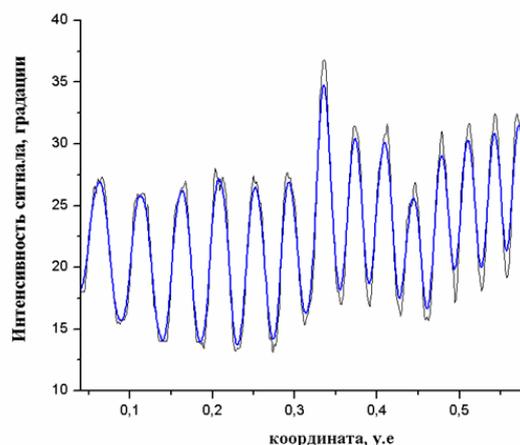


Рисунок 5 – Профиль яркости частицы при регистрации сигнала в режиме мультиэкспозиции

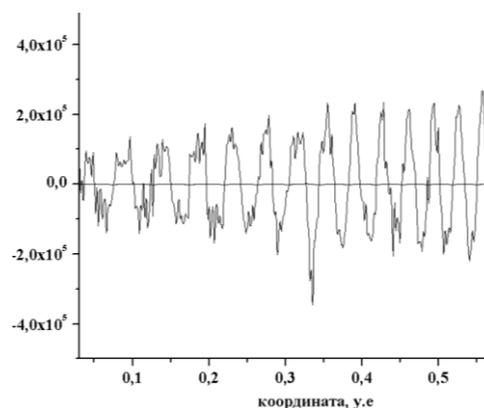


Рисунок 6 – Градиент яркости частицы при регистрации сигнала в режиме мультиэкспозиции

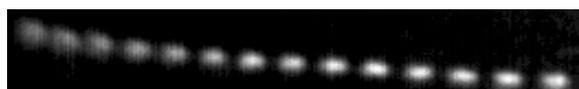


Рисунок 7 – Трек частицы при регистрации сигнала в режиме мультиэкспозиции



Рисунок 8 – Градиентный контур трека частицы при регистрации сигнала в режиме мультиэкспозиции

При выделении контуров [9] желаемый результат можно получить следующим образом: сначала изображение сглаживается, с тем чтобы получить оценку переменного фона, после чего эта оценка вычитается из исходного изображения. В идеальном случае после этой обработки

объекты остаются на постоянном фоне (с нулевым уровнем) и их можно обнаружить путем сравнения с порогом. В качестве оператора сглаживания можно использовать, например, скользящую медиану или скользящее среднее, т. е. $Y_{ij}=X_{ij}$ – медиана (X_{ij}), а если $Z_{ij}=X_{ij}$, то берем среднее $\langle X_{ij} \rangle$.

Однако, наиболее качественным способом выделения контуров треков напыляемых частиц оказалось применение локального увеличения контраста [10]. При этом использовалась *Unsharp Mask* (Контурная резкость). Эта команда позволяет управлять процессом усиления резкости: программа находит в изображении области со значительными изменениями цвета (резкий переход, сильный контраст) и заостряет их края, что приводит к усилению резкости контуров (контраста "на границах") и не влияет на остальные ("ровные") участки. При этом существует возможность управлять пороговым значением, определяющим минимальное изменение яркости.



Рисунок 9 – Контур трека частицы при регистрации сигнала в режиме мультитракционной, выделенный методом контурной резкости (*Unsharp Mask*)

Пороговое значение выбирается исходя из соотношения сигнал/шум.

Шумы измерительной системы

Измеряемой величиной в некоторой точке на плоскости изображения (пикселе) является энергетическая освещенность соответствующей светочувствительной области фотоприемника. Из-за статистической природы наблюдаемого процесса каждое измерение даст различное значение даже при стационарной температуре излучающего тела.

Первая задача выделения контуров должна определять свойства контуров, содержащихся в анализируемом изображении.

Тепловой шум является наиболее общим видом шума, возникающего в электронных формирователях сигналов изображений [11,12]. Он является результатом случайных флуктуаций электронов в резистивных элементах фотодетекторов или усилителей,

подключаемых к датчикам. Моделью теплового шума может служить аддитивный гауссовый случайный процесс с нулевым средним и дисперсией:

$$\sigma_{i_T}^2 = N_T / R$$

где N_T – мощность теплового шума на выходе системы,

R – сопротивление нагрузки.

Даже при постоянной интенсивности падающего света ток фотодетектора не является строго постоянной величиной. При малых уровнях освещенности число электронов, испускаемых фотодетектором, определяется плотностью распределения вероятностей Пуассона. Для времени наблюдения t распределение вероятностей числа импульсов тока фотодетектора определяется выражением

$$\Pr\left(i_p = \frac{j q}{\tau}\right) = \frac{(u_S + u_H)^j \exp\{-(u_S + u_H)\}}{j!}$$

где j – положительное целое число,

q – заряд электрона,

u_S – среднее число электронов, испускаемых фотодетектором при его освещении,

u_H – среднее число испускаемых электронов, обусловленных темновым током фотодетектора и посторонним фоновым излучением.

За исключением низкоуровневых условий формирования изображений, при которых только незначительное количество электронов накапливается в отдельном элементе датчика, пуассоновское распределение хорошо аппроксимируется нормальным.

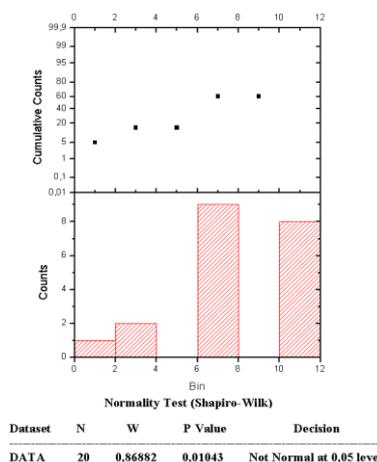


Рисунок 10 – Гистограмма распределения шума при малом сигнале

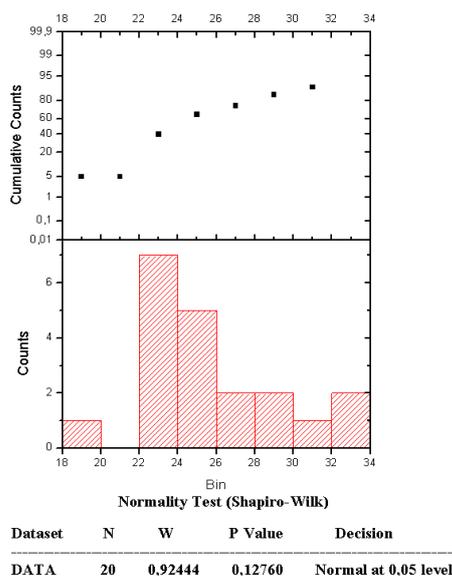


Рисунок 10 – Гистограмма распределения шума при сигнале выше порогового

Следовательно, при оценке погрешности сигнала можно пользоваться стандартными формулами нахождения погрешности.

Поскольку в изображениях мы можем легко получить большое количество измерений с помощью пространственного усреднения, существует возможность измерить средние значения со среднеквадратичными отклонениями, которые гораздо меньше, чем среднеквадратичное отклонение ошибки квантования яркости в одном пикселе.

Выводы

Определение основных параметров напыления - температуры и скорости частиц в запыленных потоках времяпролетным методом и методом яркостной пирометрии основывается на использовании в качестве измерительной системы высокоскоростной видеокамеры [13,14]. Методика измерений включает этап выделения на изображении контуров излучения частиц, находящихся в конденсированной фазе [15]. Наиболее эффективным способом выделения контуров оказался метод контурной резкости (*Unsharp Mask*). В качестве порога используется экспериментально полученное соотношение сигнал/фон, определенное по изображениям нити накала эталонной лампы с известными размерами и температурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface / I. P. Gulyaev, O. P. Solonenko, P. Y. Gulyaev, A. V. Smirnov // *Technical Physics Letters*, 2009.- Т. 35, № 10.- P. 885-888.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Garkol' D.A., Gulyayev P.Yu., Evstigneyev V.V., Mukhachev A.B. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes // *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1994.- Volume 30, № 1.- P. 72-78.
6. 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.
7. Gulyaev P. Yu., Gulyaev I. P., Cui Hongzhi, Milyukova I. V. In-situ selfpropagating-high-temperature-synthesis controlled by plasma // *Вестник Югорского государственного университета*, 2012.- № 2 (25).- С. 28-33.
8. Гуляев П. Ю., Еськов А. В., Коротких В. М. Функция распределения частиц по размерам для определения степени искажения оптического сигнала ТВ-диагностики // *Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова*, 1999.- № 2.- С. 59-60.
9. Гуляев П. Ю., Гуляев Ю. П., Долматов А. В. Байесовское восстановление цвета цифровых изображений // *Вестник Сибирской государственной геодезической академии*, 1997.- №2.- С. 114-115.
10. Гончаров В.Д., Гуляев П.Ю., Гумиров М.А. Расширение динамического диапазона яркостного пирометра // *Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы*, 1999. - №1.-С.38-39.
11. Гуляев П. Ю. Оптическая диагностика процессов горения и взрыва в порошковой металлургии // *Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова*, 1998.- №1.- С. 33-36.
12. Evstigneev V.V., Guljaev P.J., Miljukova I.V., Goncharov V. D., Vagner V.A. and Gladkih A.A. Development prospects of SHS technologies in Altai state technical university // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2006.-

Volume 15, Issue 1.- P. 99-104.

13.Бороненко М. П., Гуляев П. Ю., Трифонов А.Л. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазмотрона с постоянной подачей порошка // Вестник Югорского государственного университета, 2012.- № 2 (25).- С. 16-20.

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.Бороненко М. П., Гуляев И. П., Долматов А.В. Определение основных теплофизических параметров процессов плазменного напыления //

Вестник Югорского государственного университета, 2013.- №2(29).- С. 7-16.

Бороненко Марина Петровна – аспирант, тел.: +7-346-735-77-97, e-mail: m_boronenko@ugrasu.ru; Гуляев Павел Юрьевич - д.т.н., зав. каф. ФХПМ, тел.: +7-346-735-77-97, e-mail: p_gulyaev@ugrasu.ru; Иванов Александр Александрович - студент, тел.: +7-346-735-77-97, e-mail: sum__41@mail.ru; Пермяков Иван Юрьевич - студент, тел.: +7-950-501-45-89, e-mail: fenix-86@yandex.ru.