

УДК 004.932, 004.415.2, 621.383

В.И. Иордан, А.И. Постоев, И.К. Рябченко

Обработка потока изображений при высокоскоростной съемке цифровой камерой процесса напыления порошковых покрытий

Приведена структурная схема видеорегистратора, предназначенного для изучения волновой динамики плазменных струй при напылении порошковых покрытий, а также изложен принцип его работы. Обработка потока изображений позволила определить распределения скоростей и плотности частиц в различных поперечных сечениях потока плазменной струи при напылении порошковых покрытий на детали машин.

Ключевые слова: обработка изображений, распределения скоростей и плотности частиц.

Перспективными технологиями в области материаловедения в настоящее время являются плазменное и детонационно-газовое напыление покрытий с помощью микрокапель расплавов различных порошковых материалов. Наиболее важными параметрами струи напыления при прогнозировании качества получаемых покрытий являются распределение скоростей и температур частиц в поперечных сечениях потока струи, а также и распределение объемной концентрации частиц (плотности частиц) не только в центре, но на периферии струи.

Современные высокоскоростные цифровые камеры, основанные на современных матричных фотодиодных (ФД) приемниках или приемниках на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) в виде СБИС с внутрикристалльным процессором, позволяют регистрировать оптическое излучение нагретых частиц металлических порошков, движущихся в потоке технологической струи со скоростью примерно от 100 и до 500 м/с (возможны и более высокие значения скоростей частиц).

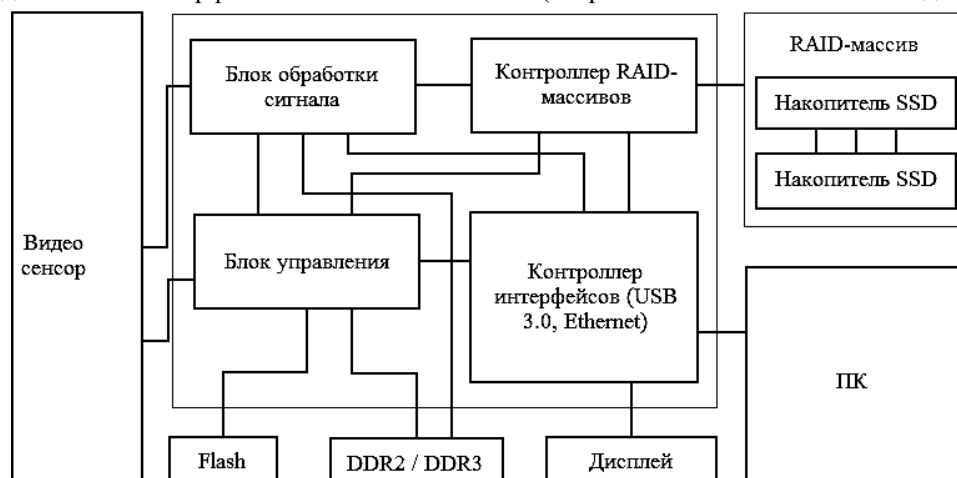
В настоящее время на рынке высокоскоростных камер представлены камеры двух разновидностей. Первый вариант представляет собой устройство, производящее запись видеопотока с высокой частотой и с минимальными корректировками изображения на носители информации, расположенные непосредственно на видеокамере с объемом информации порядка 8–64 Гб с последующим копированием на персональный компьютер. Продолжительность съемки при полном разрешении ограничена и не превышает 8–30 с. Камеры второго типа подключаются к персональному компьютеру через специализированные интерфейсы посредством специально разработанных для этих камер PCI-Express плат (длина кабеля при подключении варьируется от 2 до 100 м в зависимости от используемого интерфейса), позволяющие записывать поток изображений более длительное время, а качество и скорость съемки определяются пропускной способностью используемых в этой системе интерфейсов (например, максимальная скорость передачи данных через интерфейс Camera Link может достигать не более 2,38 Гбит/с). В обоих вариантах обработка изображений непосредственно в самих видеокамерах не производится.

Описание аппаратного обеспечения регистратора потока изображений. В настоящей статье предлагается вариант видеокамеры, сочетающий достоинства изложенных выше двух разновидностей камер и позволяющей записывать достаточно большой объем данных непосредственно в память видеокамеры с дублированием на внешний компьютер. Кроме того, обеспечивается до определенного уровня «интеллектуальности» быстродействующая обработка потока видеоизображений и вывод результатов обработки на собственный дисплей видеокамеры.

Разработка видеокамеры основана на видеосенсоре типа КМОП-ФД СБИС фотоматрицы производства компании CMOSIS. Используемая модель CMV2000 с разрешением 2048×1088 пикселей обеспечивает частоту сканирования до 340 кадров в секунду при полном разрешении кадра. В видеосенсоре CMV2000 применяется кадровый тип затвора (англ. Global Shutter), который одновременно работает со всеми пикселями матрицы, открывая (перекрывая) световой поток. С целью сокращения количества микросхем в процессе проектирования и реализации микропроцессорной системы регистратора потока изображений была применена ПЛИС компании Xilinx с архитектурой FPGA с возможностью её быстрой реконфигурации [1]. Быстродействующую интеллектуальную обработку потока изображений с выводом на дисплей камеры обеспечивает прикладное программное обеспечение (ППО), загруженное в ПЛИС. В видеокамере в качестве внешней памяти большой

емкости (рис. 1) предложено использовать твердотельный накопитель SSD (англ. solid-state drive). SSD состоит из управляющего контроллера, микросхем памяти и имеет странично-блочную организацию (запись и чтение производится по странице целиком, стирание – поблочно). В SSD используется высокопроизводительный интерфейс SATA 3-го поколения (скорости чтения и записи находятся, соответственно, на уровне 555 и 520 Мб/с).

Рис. 1. Структурная схема регистратора потока изображений



С помощью блока управления осуществляется управление процессом регистрации, обработки данных с видеосенсора и последующего вывода информации на внешние накопители или персональный компьютер в соответствии с заданным алгоритмом управления. В свою очередь, к плате ПЛИС подключаются дополнительные элементы, такие как дисковый массив, флэш-память, DDR-память, дисплей. Данные, хранимые во флэш-памяти (либо загруженные в блок управления видеосенсором из персонального компьютера), производят конфигурирование режима работы видеосенсора. Блок управления определяет размер области сканирования, частоту кадров, коэффициент усиления. При записи изображения происходит передача зарегистрированных данных от видеосенсора в блок обработки сигнала для комплексной обработки видеоизображения с последующей его передачей либо в контроллер RAID-массивов (для записи на внешние накопители), либо в контроллер интерфейсов (для передачи на внешнее устройство через специальный интерфейс). ППО, загруженное в ПЛИС, осуществляет обработку изображений, в результате которой определяет длины треков частиц, распределения скоростей и плотности частиц.

Выделение треков частиц на изображениях. Алгоритм выделения треков основан на анализе перепадов яркости на изображении – в поперечных направлениях (сверху вниз вдоль оси Y) по отношению к направлению потока частиц вычисляется производная от функции профиля яркости точек для каждой координаты X (рис. 2). Так как на зашумленном изображении довольно сложно локализовать точку изменения знака производной, эффективнее использовать точку с максимумом модуля производной.

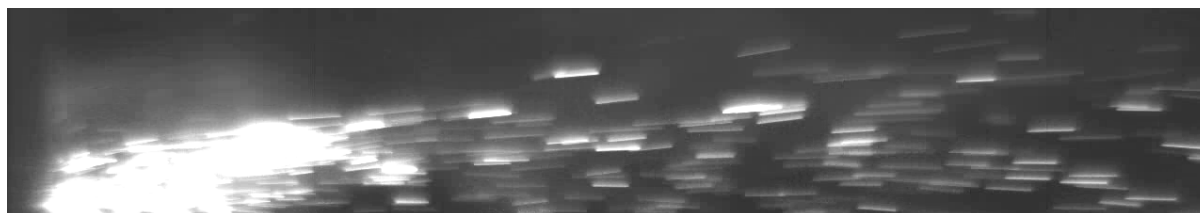


Рис. 2. Фрагмент оптического изображения треков потока частиц (капель расплава никеля), зарегистрированного высокоскоростной цифровой камерой (время экспозиции кадра 40 мкс)

Кроме того, шумы более ярко выражены в окрестности треков частиц. С целью уменьшения зашумленности изображение предварительно подвергалось сглаживанию пространственным фильтром Гаусса согласно оператору (1) с параметром $\sigma=1,4$ и размером окна в 5 пикселей:

$$g(x,y) = \exp(-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2))/(2\pi\sigma^2). \quad (1)$$

После сглаживания вычисление производной от функции профиля яркости $F(x,y)$ в поперечных направлениях (сверху вниз вдоль оси Y) для каждой координаты X вдоль оси струи производится с помощью дискретного дифференциального оператора Собеля (2):

$$G_Y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * F(x,y). \quad (2)$$

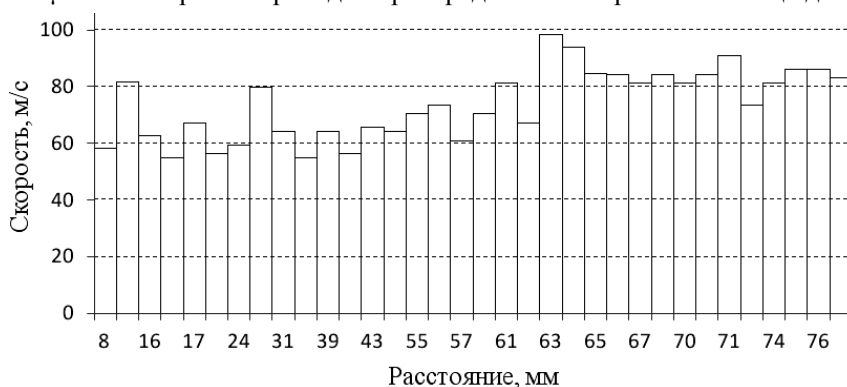
В результате применения оператора Собеля каждый трек представлен парой границ-отрезков (верхний – набор значений «положительной» производной, а нижний – набор значений «отрицательной» производной). Оказалось, что нижние границы треков более четкие и более яркие, чем верхние. Следовательно, сохраняются значения модуля отрицательной производной.

На следующем этапе производится процедура «утончения» линий треков. Пикселями линии трека объявляются те пиксели, в которых достигается локальный максимум значения производной. Затем производится двойная пороговая фильтрация изображения со значениями первого и второго порогов как 0,1 и 0,2 от значения максимального уровня яркости соответственно (рис. 3).



Рис. 3. Линии треков после «утончения» границ и после двойной пороговой фильтрации

Определение распределений скоростей и плотности частиц вдоль оси потока. На последнем этапе в соответствии с методом Хафа выполняется сканирование обработанных треков с последующим вычислением длины треков. Скорость частицы v определяется как отношение длины изображения трека L ко времени экспозиции кадра τ , умноженное на масштабный коэффициент μ , преобразующий расстояние на экране изображения в реальный пройденный частицей путь, т.е. $v = \mu \cdot L / \tau$. На рис. 4 приведено распределение скоростей частиц вдоль направления оси плазменной



струи (расстояние отсчитывается от среза ствола плазматрона).

Рис. 4. Распределение скоростей частиц вдоль направления плазменного потока

Учитывая тот факт, что длина изображения трека при фиксированной скорости частицы пропорциональна времени экспозиции кадра, которое перед съемкой можно установить очень малым, на изображениях треки частиц можно ассоциировать с ярко светящимися точками. Это свойство можно использовать для определения распределения плотности частиц в потоке струи в различные моменты времени быстротекущего процесса напыления частиц на поверхность изделия (рис. 5). На рис. 6 для каждой координаты X яркости точек изображения вдоль поперечных направлений Y просуммированы и нормированы на общую сумму яркостей всего изображения. Плотность частиц с удалением от среза ствола плазматрона имеет тенденцию к убыванию (наличие угла «раскрыва» струи ведет к понижению объемной плотности частиц).

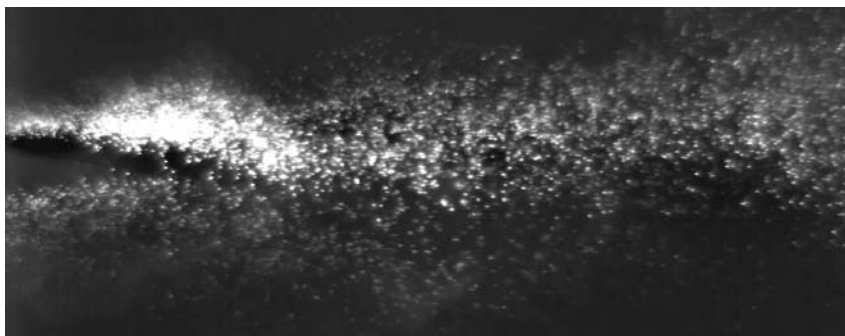


Рис. 5. Оптическое изображение потока частиц (время экспозиции кадра 2 мкс)

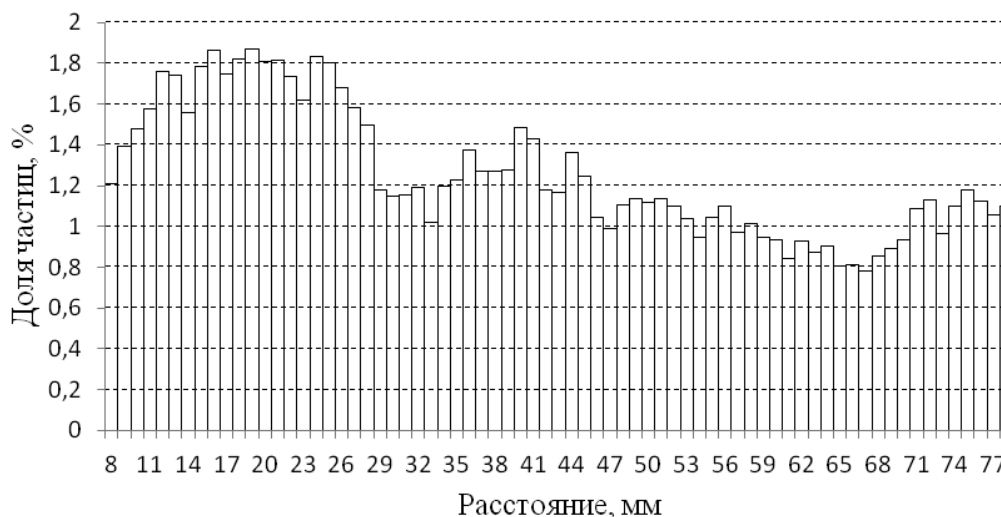


Рис. 6. Распределение плотности частиц вдоль направления плазменной струи

Заключение. На диаграмме можно отметить «чередование» участков уплотнений и разуплотнений, что подтверждает наличие волновой динамики в продольном направлении струи.

Литература

1. Постоев А.И. Высокоскоростной видеорегилятор с использованием «системы на кристалле» на основе ПЛИС архитектуры FPGA / А.И. Постоев, А.А. Соловьев, В.И. Иордан // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 147–150.

Иордан Владимир Иванович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. вычислительной техники и электроники АлтГУ
Тел.: (385-2) 38-07-51
Эл. почта: jordan@phys.asu.ru

Постоев Александр Иванович

Аспирант каф. вычислительной техники и электроники АлтГУ
Тел.: (385-2) 38-07-51
Эл. почта: alexstud@bk.ru

Рябченко Иван Константинович

Аспирант каф. вычислительной техники и электроники АлтГУ
Тел.: (385-2) 38-07-51
Эл. почта: Ryabchenko.ivan@mail.ru

Jordan V.I., Postoev A.I., Ryabchenko I.K.

Processing of image stream at high-speed photography of spraying process of powder coatings by a digital camera

We show the block diagram of video registrator meant for studying of wave dynamics of plasma jets at a spraying of powder coatings, as well as the principle of its work is stated in the paper. Processing of image stream has allowed to define the distributions of particle velocities and of particle density in various cross-sections of a plasma stream when spraying powder coatings on the machine parts.

Keywords: image processing, the distributions of particle velocities and of particle density.