

УДК 620.179

А. М. Старовойтов, Н. А. Старовойтова, А. С. Федосенко

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОМОЩИ ВЕБ-КАМЕР

В статье дано описание экспериментальной установки для контроля температурного поля нагретых тел с использованием в качестве приемника оптического ИК-излучения веб-камер с фильтром, отсекающим видимое излучение, приведены результаты экспериментов для веб-камер с разрешением 0,3 и 1,2 Мп. Представлены ИК-снимки тепловых полей и программно-обработанные ИК-снимки для тел, нагретых до температуры 260...400 °C, результат сложения программно-обработанного и необработанного изображений от двух камер, фиксирующих тепловое поле объекта одновременно. Сложение двух сигналов позволило выделить цветом участки тела, нагретые выше 260 °C, неразличимые невооруженным глазом.

### Введение

В настоящее время существует большое количество способов получения композиционных порошковых материалов для газотермического напыления покрытий. Некоторые из этих способов представлены в [1].

При получении композиционного порошка перспективным способом механического легирования исходные компоненты перетираются в шаровых аттритторах до получения материала с однородной консистенцией, состоящего в основном из частиц с размером 5 и менее микрон.

При напылении таких материалов частицы металлокерамического порошка не расслаиваются в плазменной струе вследствие различия своих массы и плотности, как это происходит при напылении механической смеси, состоящей из частиц металла и керамики, а частицы керамических или металлических порошков лучше прогреваются и сплавляются друг с другом. Поэтому покрытия из этого порошка обладают лучшими физико-механическими и эксплуатационными свойствами по сравнению с покрытиями, напыленными обычными, серийно выпускаемыми порошковыми материалами. Например, такие покрытия обладают меньшей пористостью и большей прочностью сцепления с основой [2].

В [3] было показано, что механическая энергия, передающаяся частицам порошка при обработке в аттритторах, частично накапливается в них в виде искажений кристаллической решетки. Эта энергия при нагреве и плавлении переходит в тепловую энергию, что способствует лучшему прогреванию частиц и улучшает качество напыленного слоя. Кроме того, обеспечивается более полное протекание химических и физических процессов между компонентами обработанного в аттритторе композиционного порошка при нагреве их в плазменной струе.

Керамические и металлокерамические композиционные материалы, полученные методом реакционного механического легирования, являются перспективными для напыления твердых и износостойких плазменных покрытий на рабочие поверхности деталей машин, работающих в условиях значительных контактных нагрузок и сопровождающихся интенсивным износом [4]. В таких условиях работают, например, детали волочильных машин для производства медной и стальной проволоки.

Следует отметить, что покрытия, напыляемые на детали волочильных машин (рис. 1), должны быть более толстыми (более 1 мм) по сравнению с обычными плазменными покрытиями, толщина которых колеблется в пределах 100...300 мкм.



Рис. 1. Кольца волочильных машин с металлокерамическим покрытием

Такие условия ставятся потребителями (кабельными заводами) для того, чтобы иметь возможность перешлифовывать покрытие по мере износа.

Нагрев таких покрытий в процессе напыления протекает более интенсивно. При этом вследствие существенной разницы коэффициентов термического расширения керамического покрытия и металлической детали в нанесенном

слое могут образовываться трещины. Поэтому контроль за тепловым состоянием поверхности детали в процессе напыления является важной проблемой, от успешного решения которой зависит стабильность качества напыления.

Кольцо волочильной машины с покрытием, треснувшим и отслоившимся в процессе напыления, показано на фотографии (рис. 2).



Рис. 2. Кольцо с треснувшим покрытием

Плазменное напыление защитных и износостойких покрытий из порошковых материалов с использованием дугового плазмотрона приводит к быстрому нагреву поверхности напыляемой детали вследствие обдува ее потоком высо-

котемпературного газа и кристаллизации на ней в покрытии расплавленных частиц порошка.

Согласно техническим требованиям к технологии плазменного напыления [5], деталь, на которую наносится

покрытие, не должна нагреваться выше 250...300 °С, поскольку ее перегрев может привести к таким нежелательным последствиям, как термические деформации детали, изменение структуры металла детали, ухудшение физико-механических свойств покрытия и даже его растрескивание и/или отслоение.

Для технологии плазменного напыления покрытий на поверхность деталей актуальной проблемой является измерение их температуры в реальном времени. Это позволяет напылять детали без перегрева и, соответственно, снижает вероятность получения брака, возникающего вследствие различия коэффициентов линейного термического расширения напыляемого покрытия и подложки, на которую оно наносится.

Использование тепловизоров для решения подобных задач нецелесообразно вследствие их высокой стоимости, избыточности получаемой информации, неудобства ее считывания в процессе плазменного напыления. Пирометр дает информацию о температуре малого участка поверхности. Чтобы по-

лучить сведения о зонах возможного перегрева на больших деталях сложной конфигурации (например, коленчатых валах большегрузных автомобилей), необходимо разрабатывать специальное сканирующее устройство, использование которого значительно увеличивает операционное время. К тому же за время прохождения сканирующего устройства по всей поверхности последняя ее точка может успеть остить до некритической температуры.

В связи с этим было предложено использовать веб-камеру для мгновенного контроля распределения тепловых полей нагретой детали. Это предложение основано на следующих предпосылках.

Современная веб-камера представляет собой цифровое устройство, производящее видеосъемку, преобразование аналогового видеосигнала в цифровой, сжатие цифрового видеосигнала и передачу видеоизображения по компьютерной сети [6]. Структурная схема камеры представлена на рис. 3.

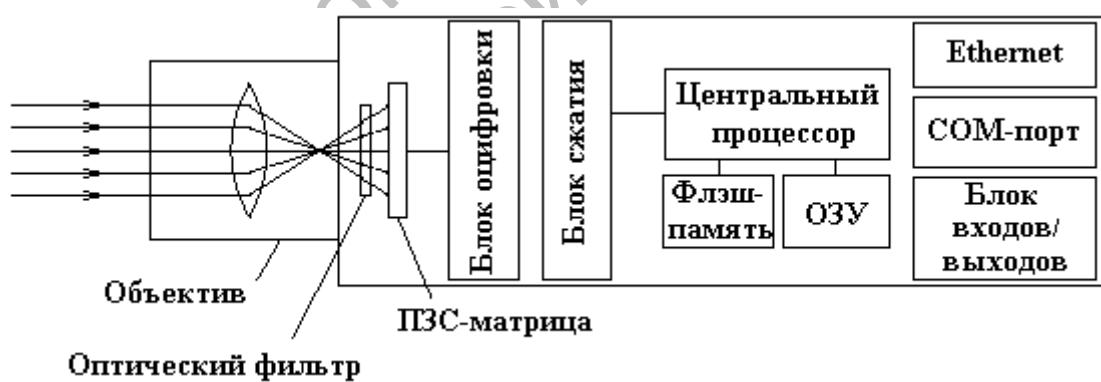


Рис. 3. Структурная схема веб-камеры

В качестве фотоприемника в большинстве веб-камер применяется ПЗС-матрица (ПЗС, CCD – прибор с зарядовой связью) – прямоугольная светочувствительная полупроводниковая пластинка с отношением сторон 3 : 4, которая преобразует падающий на нее

свет в электрический сигнал. ПЗС-матрица состоит из большого числа светочувствительных ячеек. Для того чтобы повысить световую чувствительность ПЗС-матрицы, нередко формируют структуру, которая создает микролинзу перед каждой из ячеек. В техни-

ческих параметрах веб-камеры обычно указывают формат ПЗС-матрицы (длина диагонали матрицы в дюймах), число эффективных пикселей, тип развертки (построчная или чересстрочная) и чувствительность.

Оптические инфракрасные (ИК) отсекающие фильтры, которые устанавливают в веб-камеры, представляют собой оптически точные плоскопараллельные пластинки, монтируемые свер-

ху ПЗС-матрицы. Они работают как оптические низкочастотные фильтры с частотой среза около 700 нм вблизи красного цвета, отсекают инфракрасную составляющую световых волн, обеспечивая веб-камере правильную цветопередачу.

Спектральная чувствительность (рис. 4) различных матриц, используемых в веб-камерах, охватывает ближнюю ИК-область [7].

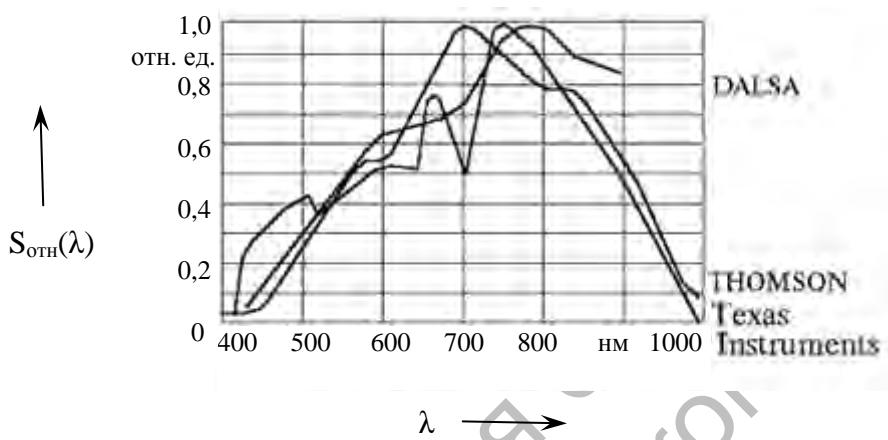


Рис. 4. Спектральные характеристики различных матриц

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод: если в веб-камере оптический инфракрасный отсекающий фильтр заменить фильтром, отсекающим видимый диапазон излучений, то можно получить инфракрасное изображение от нагретого тела, т. е. фактически тепловое поле нагретого тела. Это означает, что веб-камеру с фильтром, отсекающим видимое излучение, можно использовать для оперативного контроля распределения тепловых полей деталей и своевременного выявления участков перегрева. Большим преимуществом является возможность контроля температуры деталей непосредственно в процессе нанесения плазменных защитных покрытий самим оператором плазменного напыления, что сокращает операционное время, позволяет снизить процент брака и не требует дополнительных рабочих мест.

### Постановка задачи

В ходе проверки указанной гипотезы необходимо решить следующие задачи.

1. Заменить в веб-камере фильтр, отсекающий ИК-излучение, фильтром, отсекающим видимое излучение.
2. Собрать экспериментальную установку, позволяющую произвольным образом изменять температуру нагрева тела (модели).
3. Выяснить, какой нижний порог чувствительности имеет веб-камера (какую минимальную температуру регистрирует).
4. Получить на экране компьютера изображение нагретого тела в реальном времени с выделением на нем участков перегрева.

### Методика проведения эксперимента

Для проведения эксперимента были использованы две веб-камеры: одна – фирмы A4Tech модель PK-750MJ с разрешением 0,3 Мп, вторая – фирмы ACME модель CA-01 с разрешением 2 Мп. Конструкции обеих камер позво-

ляют удалить оптический инфракрасный отсекающий фильтр, а вместо него установить фильтр, отсекающий видимое излучение. В данном случае был использован стандартный фильтр ИКС-5.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки

На рис. 5 представлена собранная экспериментальная установка. Она состоит из источника переменного напряжения, проволочной спирали, неравномерно намотанной на каркас, цифрового прибора, измеряющего температуру при

помощи термопары, подключенной к спирали в месте наиболее густой намотки. На рис. 6 можно видеть, что при выключенном источнике напряжения цифровой прибор показывает комнатную температуру (20 °C).

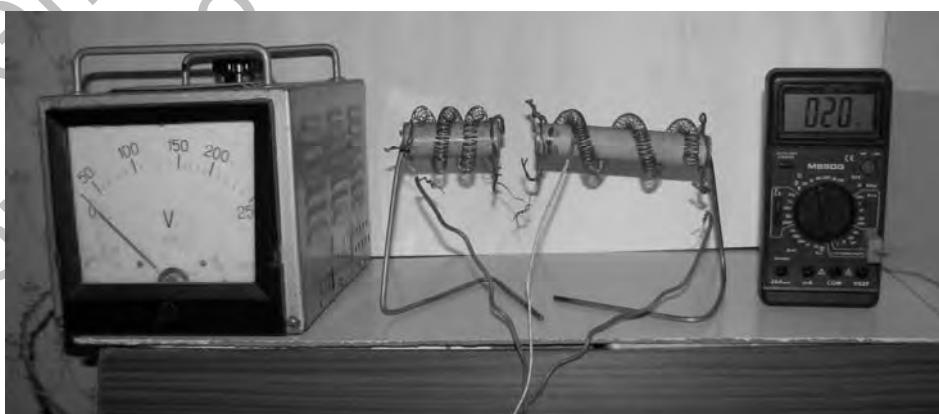


Рис. 6. Экспериментальная установка

В ходе эксперимента изменением напряжения регулировалась температура нагрева проволочной спирали и одновременно регистрировалось изображение, передаваемое веб-камерой на экран компьютера. Видеосигнал при необходимости обрабатывался при помощи специального программного обеспечения.

### Результаты эксперимента

Сначала проволочная спираль нагревалась до температуры  $\approx 360$   $^{\circ}\text{C}$ . Изображения от двух веб-камер представлены на рис. 7.

На рис. 7 видно, что участки проволочной спирали, нагретые до 363  $^{\circ}\text{C}$ , невооруженным глазом неразличимы, а

на изображениях веб-камер в ИК-свете хорошо заметны.

Затем температура постепенно понижалась. При 300  $^{\circ}\text{C}$  зона нагрева на изображении от веб-камеры с разрешением 0,3 Мп стала практически неразличима, камера с разрешением 2 Мп эту температуру еще фиксирует (рис. 8).

При дальнейшем понижении температуры обе камеры перестают регистрировать зоны нагрева. Однако применением специального программного обеспечения удалось понизить порог температурной чувствительности веб-камер еще примерно на 50  $^{\circ}\text{C}$ . Изображения от веб-камер при температуре 250...260  $^{\circ}\text{C}$  представлены на рис. 9.

а)



б)



в)

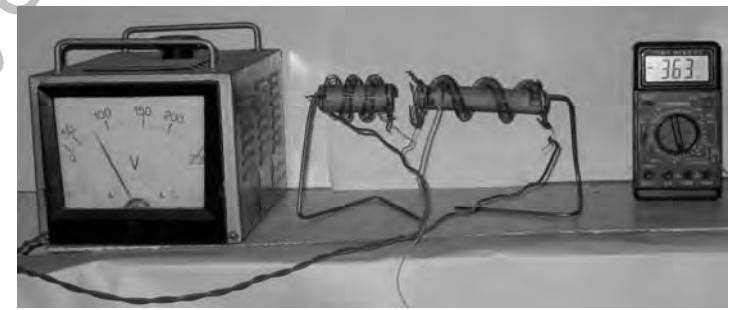
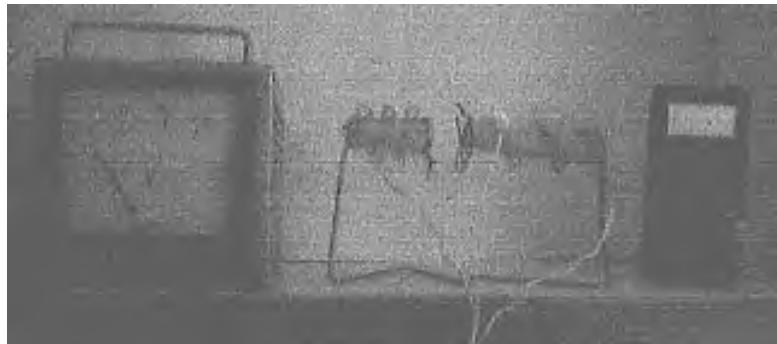


Рис. 7. Изображение тела, нагретого до 363  $^{\circ}\text{C}$ : а – изображение в ИК-свете с переделанной камеры с разрешением 0,3 Мп; б – изображение в ИК-свете с переделанной камеры с разрешением 2 Мп; в – изображение в обычном свете

а)



б)



в)

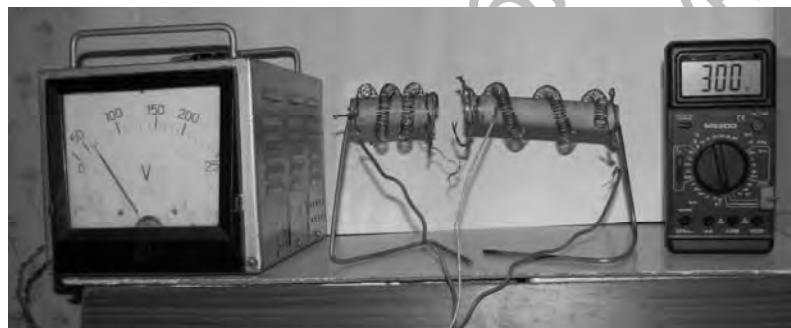


Рис. 8. Изображение тела, нагретого до 300 °C: а – изображение в ИК-свете с переделанной камерой с разрешением 0,3 Мп; б – изображение в ИК-свете камеры с разрешением 2 Мп; в – изображение в обычном свете

а)



б)



Рис. 9. Программно-обработанное изображение нагретого тела: а – изображение с камеры с разрешением 0,3 Мп при температуре нагрева 260 °C; б – изображение с переделанной камеры с разрешением 2 Мп при температуре нагрева 250 °C

Как видно из рис. 9, температуру 250 °С веб-камера с разрешением 2 Мп регистрирует при условии дополнительной цифровой обработки видеосигнала. Однако на практике этого изображения явно недостаточно, поскольку по нему невозможно точно определить, в каком именно участке тело нагрето до искомой температуры. При производстве же плазменного напыления выявление конкретных зон перегрева является принципи-

альным вопросом. Для того чтобы устранить этот недостаток, сигналы от двух веб-камер, находящихся рядом, были суммированы. Причем с камеры с разрешением 0,3 Мп был взят программно-обработанный сигнал, а с камеры с разрешением 2 Мп – обычный сигнал видимого диапазона. В результате суммирования получено изображение объекта в обычном свете с выделенным красным цветом участком перегрева (рис. 10).

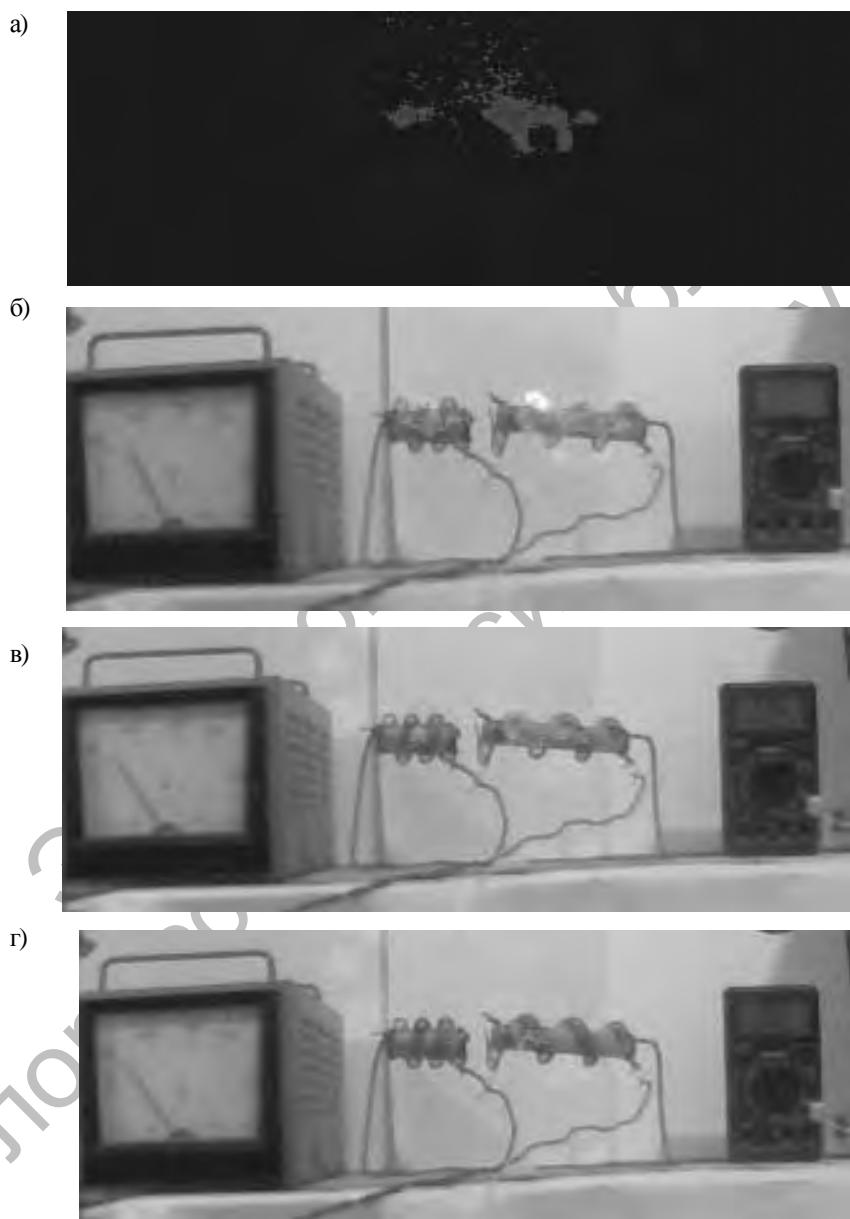


Рис. 10. Сложение сигналов от двух веб-камер при различных температурах: а – температурная маска от камеры с разрешением 0,3 Мп при температуре 400 °С; б – сложение двух сигналов при температуре 400 °С; в – сложение двух сигналов при температуре 360 °С; г – сложение двух сигналов при температуре 260 °С

Таким образом, в ходе эксперимента удалось получить изображение нагретого тела с цветным выделением участков, нагретых выше 260 °С.

Для нахождения различий между зонами покрытия детали с разной температурой были проведены предварительные эксперименты с применением ПЗС-матрицы видеокамеры, в которой фильтр, отсекающий ИК-излучение, был заменен фильтром, отсекающим излучение видимого спектра. Сигнал с видеокамеры поступал на ЭВМ в реальном времени. Плазмотроном нагревался стальной вращающийся вал диаметром 50 мм, и термопарой замерялась его температура в месте нагрева. Инфракрасное изображение вала на экране монитора появлялось при температуре около 300 °С. Затем на вал наносилось металлическое покрытие. На ИК-изображении покрытия наблюдалась

четко выраженная градация от белого цвета в центре зоны напыления (в месте наибольшего нагрева) к почти черному на краях участка (зона наименьшего нагрева). На изображении напыленного участка были обнаружены точечные зоны с повышенной светимостью, не различимые невооруженным глазом. При последующем удалении покрытия с вала на внутренней стороне покрытия были выявлены участки отслоения от поверхности детали вследствие ухудшения теплоотвода.

В результате эксперимента установлено, что использование инфракрасного изображения детали в реальном режиме времени позволит своевременно выявлять участки перегрева покрытия, которые могут свидетельствовать о наличии в покрытии трещин и отслоений, не различимых при визуальном контроле (рис. 11).

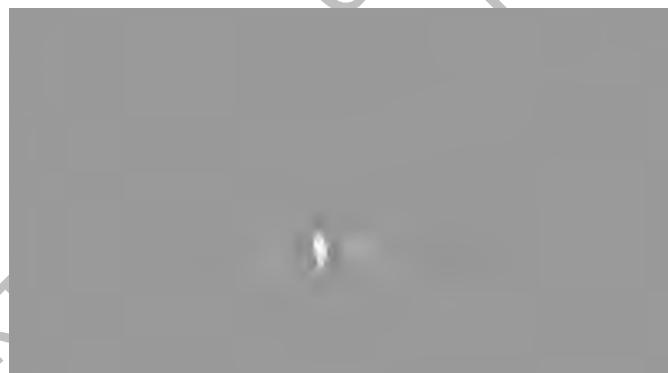


Рис. 11. Свечение в инфракрасном свете участка перегретого покрытия на кольце

Разработанное устройство для контроля теплового состояния детали проходило экспериментальную проверку при напылении опытной партии деталей волочильных машин. К настоящему времени эти детали успешно прошли производственные испытания на одном из белорусских кабельных заводов.

### Заключение

Проведенные исследования показали возможность оперативного контроля за тепловым состоянием деталей в

процессе напыления на их поверхность металлических, керамических и металлокерамических плазменных покрытий с помощью веб-камер. Дальнейшее улучшение этого способа контроля температуры поверхности может производиться различными способами, в частности, дополнительным охлаждением матрицы веб-камеры, совершенствованием программного обеспечения для обработки изображений и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. – Л. : Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1985. – 199 с.
2. Перспективные технологии плазменного напыления / О. П. Солоненко [и др.] // Машиностроитель. – 2005. – № 3. – С. 36–37.
3. Влияние механического легирования на структуру и свойства покрытий, полученных плазменным напылением композиционного порошка  $\text{NiCr-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  / Л. К. Кондратенко [и др.] // Металлы. – 1992. – № 4. – С. 209–217.
4. **Ловшенко, Ф. Г.** Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф. Г. Ловшенко, Ф. И. Пантелейенко,
5. Газотермическое напыление покрытий : сб. руководящих техн. материалов. – Киев, 1990.
6. Цифровые веб-камеры: принцип работы, описание, характеристики и каталог веб-камер // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : <http://www.armosystems.ru/support/faq/2.htm>. – Дата доступа : 01.05.2010.
7. Использование веб-камер // Общая астрономическая конф. // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : <http://www.starlab.ru/archive/index.php/t-1287.htm>. – Дата доступа : 01.05.2010.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 19.05.2010

**A. M. Starovoitov, N. A. Starovoitova,  
A. S. Fedosenko**  
**The experimental research into the possibility  
of controlling the temperature of plasma  
coatings by means of web-cameras**

The research paper gives the description of the experimental installation for controlling the thermal field of heated bodies with the usage of web-cameras as the receiver of optical infra-red radiation. These cameras have the filter cutting off the visible radiation. The paper presents the results of the experiments with web-cameras having the resolution of 0,3 and 1,2 Mp. The paper also gives infra-red pictures of thermal fields, software-processed infra-red pictures for bodies heated up to 260...400 °C, the result of combining the software processed and unprocessed images from two cameras fixing the thermal field of the object simultaneously. Combining two signals has allowed setting off in color the parts of the object, heated over 260 °C, which are unseen by an unaided eye.

Электронная библиотека  
Белорусско-Российского университета