

Между обрабатываемым изображением со смещённым тест-объектом и шаблоном **определялась кросскорреляционная матрица** по формуле:

$$I_{cc_{u,v}} = \frac{\sum_{x,y} (f(x,y) - \overline{f_{u,v}}) (t(x-u, y-v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x,y) - \overline{f_{u,v}})^2 \sum_{x,y} (t(x-u, y-v) - \bar{t})^2}}$$

где  $f$  – исследуемое изображение с тест-объектом;  $\bar{t}$  – среднее значение шаблона;  $\overline{f_{u,v}}$  – среднее значение  $f(x, y)$  в области под шаблоном [3, 4]. По полученной кросскорреляционной матрице **определялись координаты центра тяжести** по следующей формуле:

$$Cx, Cy = \frac{\sum_{u=1} \sum_{v=1} I_{cc_{u,v}} \cdot u, v}{\sum_{u=1} \sum_{v=1} I_{cc_{u,v}}}$$

где  $I_{cc_{u,v}}$  – степень корреляции в ячейке  $u, v$  кросскорреляционной матрицы.

Численные исследования проводились на основе разработанной математической модели. Произведён расчёт погрешности определения координат центра тяжести, для тест-объектов различных диаметров: 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикселей фотоприёмника, а также значений отношения сигнал/шум: 200, 20, 10. Расчёт производился в программном пакете MATLAB для выборки, состоящей из 100 изображений, для каждого диаметра тест-объекта. Изображения отличались друг от друга случайным характером шумов фотоприёмника. По каждому изображению определялся центр тяжести. Задавалось смещение тест-объекта на 0,5 пикселя и вычислялась погрешность как разница между заданным и фактическим смещением тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника. Затем значения погрешности усреднялись по всей выборке с учётом весов. Полученные средневзвешенные результаты зависимости погрешности определения центра

изображения тест-объекта на фотоприёмнике от диаметра тест-объекта для кросскорреляционного алгоритма и только алгоритма определения центра тяжести представлены на рисунке 1.

**Выводы** по особенностям применения кросскорреляционного алгоритма для поиска координат центра изображения по сравнению с алгоритмом по центру тяжести:

1. Кросскорреляционный алгоритм требует в 18 раз больше по времени вычислительных ресурсов.

2. Для отношения сигнал/шум более 20 и для диаметра тест-объекта менее 30 пикселей точность кросскорреляционного алгоритма сравнима с точностью алгоритма по центру тяжести.

3. При наличии на фотоприёмнике паразитных изображений, возможно применение только кросскорреляционного алгоритма.

### Литература

1. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприёмниками. // Журнал «Наука и техника». – 2015. – № 5. – С.71–76.

2. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах. // Журнал «Наука и техника». – 2018. – № 17(1) – С. 79–86. DOI:10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86.

3. Jae-Chern Yoo, Tae Hee Han. Fast Normalized Cross-Correlation / Circuits, Systems and Signal Processing. (2009) 28: 819. DOI:10.1007/s00034-009-9130-7.

4. Haralick, Robert M., and Linda G. Shapiro, Computer and Robot Vision, Volume II, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1992, pp. 316–317.

УДК 762.8:621.787

## ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ

Федорцев В.А., Власенко Е.П.

ООО «Интеллектуальные процессоры», резидент НТП БНТУ «Политехник» Минск, Республика Беларусь

Высокое качество изделий в машино- и приборостроении может быть обеспечено для ряда ответственных деталей и специальной технологической оснастки, изготавливаемых из сталей и железоуглеродистых сплавов, только за счёт получения на их рабочих поверхностях износостойких покрытий из порошковых материалов.

В работе [1] предложен способ получения покрытий из самофлюсующихся твёрдых сплавов системы Ni–Cr–B–Si газотермическим напылением с последующим их оплавлением лазерным лучом

для обеспечения монолитного сцепления полученного слоя с основой изделия, чтобы избежать объёмного разогрева всей детали. Высокие скорости нагрева и охлаждения покрытия, имеющие место при лазерной обработке, способствуют также формированию специфической мелкозернистой структуры покрытия с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Однако существенным недостатком рассматриваемого способа является объёмный разогрев упрочняемой поверхности на первой стадии про-

цесса при газотермическом напылении порошкового материала, который может привести к короблению изделий, особенно тонкостенных, в виде листов, полос и т. д. Кроме того в производственных условиях имеют место повышенные затраты на техническое осуществление самого процесса газотермического напыления и образование негативных побочных факторов экологического характера.

Одним из вариантов усовершенствования рассматриваемого метода упрочнения поверхностей металлических изделий может быть способ получения покрытий на деталях ферромагнетиков Fe-Va и Fe-Ti за счёт химических реакций и механического перемешивания расплава на поверхности детали и материала ферропорошка находящихся в магнитном поле [2]. Однако в процессе перемешивания формируется переходный слой с низкими физико-механическими свойствами при достигаемой толщине электромагнитных покрытий 400–600 мкм. Указанной толщины недостаточно для обеспечения необходимого припуска на осуществление окончательной механической обработки.

Для устранения рассматриваемого технологического недостатка осуществляется, например нанесение покрытия на упрочняемую поверхность шликера с клеевой составляющей и последующее воздействие на модифицированную поверхность сфокусированного лазерного излучения.

Однако вследствие этого процесса на поверхности покрытия появляется повышенная пористость и шероховатость, которая возникает в результате испарения и газообразования клеевой составляющей шликера, а также в ходе выгорания связки на границе в зоне проплавления. Данное обстоятельство не позволяет наличие таких дефектов на поверхности для таких деталей, как матрицы и пуансоны, используемые при производстве стеклянных и пластмассовых изделий. Рассматриваемый метод нанесения покрытий находит применение только в ремонтном производстве для случаев упрочнения локальных участков восстанавливаемых поверхностей, например гнёзда под клапана в двигателях. При этом испарение клеевой составляющей шликера в процессе его оплавления лучом лазера отрицательно влияет на экологическую составляющую рабочего места.

Авторами данной работы предложен метод формирования упрочняющих покрытий на металлических изделиях с высоким уровнем износостойкости и низкой шероховатостью поверхностного слоя.

Первоначально на поверхность основы детали наносят смесь порошков: 50–70 % ферромагнитного (железо-ванадий) и 50–30 % никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 (ГОСТ 21448-75). Твёрдость не менее 55,9 HRC. Фрак-

ционный состав 40-100-160 мкм. Применение мелких частиц приводит к более интенсивному окислению и их частичному выгоранию. Кроме того, при их использовании часто забивается сопло плазмотрона. Далее на металлическое изделие накладывают постоянное магнитное поле с индукцией 1,0–1,8 Тл.

Использование смеси при содержании ферромагнитного сплава «железо-ванадий» (Fe-Va) в количестве 50–70 мас. %, обеспечивает (при постоянном наложении на изделие магнитного поля с магнитной индукцией 1,0–1,8 Тл в зоне обработки) образование устойчивого «каркаса-сетки» из частиц ферромагнетика, который удерживает остальные частицы на упрочняемой поверхности изделия в процессе обработки.

Количество частиц порошка ферромагнетика Fe-Va менее 50 мас. % уменьшает удерживающую способность этого каркаса даже при верхнем значении заявленного предела магнитной индукции в зоне обработки.

Количество частиц порошка ферромагнетика Fe-Va более 70 мас. % резко уменьшает содержание никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 в составе шликера, что сказывается на износостойкости формируемого покрытия.

Использование уровня магнитной индукции менее 1,0 Тл не обеспечивает достаточную жёсткость формируемого «каркаса-сетки» для удержания смеси порошка в процессе лазерной обработки и увеличения уровня магнитной индукции выше заявленного значения. В тоже время уровень магнитной индукции выше 1,8 Тл не обеспечивает повышения эффективности процесса упрочнения, и лишь увеличивает затраты электроэнергии.

Градиент температуры в зоне воздействия лазерного излучения на участок нанесённого слоя смеси порошков не превышает точку Кюри и сохраняет магнитные свойства поверхности, что позволяет удерживать частицы ферромагнитного порошка в процессе упрочнения.

В ходе проведения практических экспериментов осуществлялась обработка технологических режимов. В качестве образцов использовались пластины из стали 20 диаметром 20 мм и толщиной 12 мм, предварительно очищенные дробеструйной обработкой от загрязнений и окисных плёнок. На поверхность образцов насыпали смеси порошков ферромагнитного сплава Fe-Va и никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 толщиной 0,8–1,0 мм (таблица 1).

На данные образцы со слоем смеси порошков накладывали постоянное магнитное поле с помощью специального устройства, имеющего плоский магнитный полюсный наконечник и используемого для магнитно-абразивного полирования, которое в целом позволяло создавать на изделии магнитное поле с магнитной индукцией 0,8-2,0 Тл в зоне обработки. Слой смеси порош-

ков на образцах подвергали воздействию непрерывного лазерного излучения на установке ЛГН-702 «Кардамон» (Россия) (таблица 2) [3].

Таблица 1 – Химический состав сплава ПГ-СР4

Наименование вещества	Процентное содержание, %
<i>Основные</i>	
Углерод	0,6 – 1,0
Хром	15,0 – 18,0
Кремний	3,0 – 4,5
Бор	2,8 – 3,8
Железо	не более 5,0
<i>Вспомогательные</i>	
Сера	0,04
Фосфор	0,04

Таблица 2 – Основные технические характеристики лазера модели ЛГН-702

Наименование параметра	Численное значение
Активная среда	СО <sub>2</sub> (с продольной прокачкой)
Рабочая длина волны	10,6 мкм
Мощность излучения	800±5 Вт
Скорость перемещения лазерного луча	20, 15, 10 и 5 мм/с
Мода генерации	К <sub>0</sub> =0,08
Угловая расходимость	3 мрад

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

№ образца	Состав смеси порошков, масс.%		Магнитная индукция в зоне обработки, Тл	Ra, мкм	Пористость, %	Величина износа, мкм
	Fe-Va	ПГ-СР4				
1	40	60	0,8	35	10	9,5
2	50	50	1,0	25	5	5,5
3	60	40	1,4	20	4	5,0
4	70	30	1,8	26	6	5,5
5	80	20	2,0	40	12	7,5

Режимы обработки: скорость перемещения лазерного луча – 200 мм/мин, диаметр лазерного луча – 2,5 мм и коэффициент перекрытия дорожек лазерной обработки – 0,8 обеспечивали про-

плавление слоя смеси порошков на упрочняемых образцах.

Обработанную лучом лазера поверхность образцов I-го типа оценивали по параметру шероховатости Ra на профилографе–профилометре модели 252, а затем шлифовали и полировали, чтобы оценить пористость покрытия с помощью микроскопа МИМ-8М в поляризованном свете. Обработанную лучом лазера поверхность образцов II-го типа после шлифования проверяли на износостойкость на машине торцового трения. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3.

Испытания образцов на износостойкость проводили на следующих режимах: давление P = 1,24 МПа, скорость скольжения V = 2 м/с, время испытаний – 3 часа, среда – масло индустриальное 20. Контртело – трубки из твердого сплава ВК-8.

Предложенный способ получения износостойких покрытий на металлических изделиях обеспечивает значительное снижение шероховатости и пористости формируемых покрытий при сохранении высокого уровня износостойкости упрочненного слоя изделий.

Выход за пределы предложенного состава смеси порошков и магнитной индукции в зоне обработки приводит к возрастанию шероховатости и пористости покрытия, а также увеличивает износ образцов.

#### Литература

1. Кардополова М.А., Спиридонов Н.В., Станкевич О.Н. Влияние режимов лазерной обработки на микроструктуру // Машиностроение: Республ. Межвед. сб. – Вып. 10. – Мн. : Выш. школа, 1985. – С. 120.
2. P. Roupová, O. Schneeweiss. Preparation and analysis of Fe-Zr, Fe-Ti, and Fe-V composites for hydrogen storage. Materials Structure, vol. 18, № 3. – 2011. – P.218–219.
3. Алейников В.С., Беляев В.П. и др. Лазерная установка «Кардамон» // Электронная промышленность, 1981. – № 5–6. – С. 39–51.

УДК 535.339; 621.317

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На протяжении многих лет ученых привлекает идея создания светоизлучающего диода совместимого с технологией производства кремниевых интегральных схем. Наиболее перспективными материалами активных сред разрабатываемых светоизлучающих структур на основе кремния являются оксид (SiO<sub>x</sub>), нитрид (SiN<sub>x</sub>) и

оксинитрид (SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>) кремния. Спектроскопия электролюминесценции (ЭЛ) является ключевой методикой, позволяющей определить пригодность разрабатываемых структур для создания на их основе приборов кремниевой оптоэлектроники. Метод ЭЛ обладает высокой чувствительностью к наличию дефектов и примесей и позволя-