

$$\omega \delta t = (nr - nl) \text{step} / l; \quad (9)$$

$$ICC = [x - R \sin \theta, y + R \cos \theta]. \quad (10)$$

Полученное кинематическое уравнение в основном зависит от конструкции и размеров деталей ходовой части робота. Изменение конструкции может привести к корректировке уравнений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Джозеф, Л. Изучение робототехники с использованием Python / Л. Джозеф ; пер. с англ. А. В. Корягина. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 250 с.

УДК 621.793.74

## ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

**А. Р. Каготько**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Е. Н. Демиденко

*Произведен сравнительный анализ покрытий, напыленных плазменным методом. Проведено исследование покрытий на возможность использования их как фрикционного покрытия на деталях тормозных/фиксирующих механизмов. Были рассмотрены два покрытия – оксидная керамика электрокорунд белый 25А и покрытие на основе никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-ХН80СР4, – упрочненных диоксидом титана. Изучены физико-механические свойства покрытия и его структура. Произведен элементный анализ.*

**Ключевые слова:** плазменное напыление, композиционные покрытия, самофлюсующиеся порошки, оксидная керамика, оксид алюминия, оксид титана.

## PLASMA SPRAYING OF CERAMIC COATINGS

**A. R. Kagotko**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Science supervisor E. N. Demidenko

*This article provides a comparative analysis of coatings sprayed using plasma methods. A study of coatings was carried out to determine the possibility of using them as a friction coating on parts of brake/locking mechanisms. Two coatings were considered: oxide ceramics electrocorundum white 25A and a coating based on nickel self-fluxing alloy PG-XH80CP4 strengthened with titanium dioxide. The physical and mechanical properties of the coating and its structure were studied, and an elemental analysis was performed.*

**Keywords:** plasma spraying, composite coatings, self-fluxing powders, oxide ceramics, aluminum oxide, titanium oxide.

Сплавы на основе никеля представляют особый интерес. Среди сплавов на основе никеля особое место занимают самофлюсующиеся сплавы. Проводился также ряд исследований, которые показали перспективность использования данного материала с содержанием тугоплавких оксидов в качестве упрочняющей фазы, в частности диоксид титана TiO<sub>2</sub>. В данном случае диоксид титана вводится в состав само-

### 390 Перспективные направления совершенствования материалов и технологий

флюсующегося порошка для придания покрытию более высоких эксплуатационных свойств.  $TiO_2$  придает материалам большую пластичность и стойкость к ударным нагрузкам [1].

Целью данной работы является выбор покрытия, напыленного плазменным методом, для использования как антифрикционного слоя на деталях тормозных/фиксирующих механизмах.

В работе исследовались следующие материалы и покрытия:

– покрытие, полученное напылением смеси порошков ПГ-ХН80СР4 с диоксидом титана (объемное содержание  $TiO_2$  составляет 15–33 %), оплавленное после нанесения в соответствии с технологией напыления самофлюсующихся покрытий по ГОСТ 28844–90 (табл. 1, 2);

– покрытие, полученное напылением порошка электрокорунд белый 25А, фракция порошка 10–15 мкм.

Таблица 1

Химический состав сплава для напыления

Материалы	С	В	Si	Ni	Cr	Fe	Примеси	Твердость
Содержание компонентов, мас. %								
ПГ-ХН80СР4	0,6–10	2,8–3,8	3,0–4,5	основа	15–18	< 5,0	–	55HRC

Таблица 2

Химический состав электрокорунда белого марки 25А, ГОСТ 28818–90, %

$Al_2O_3$	$Na_2O$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	Остальное
> 99	< 0,3	< 0,2	< 0,05	Примеси

Поверхность детали, изготовленной из стали 40Х, подвергали струйно-абразивной обработке чугушной колотой дробью в соответствии с ГОСТ 28844–90 для повышения адгезии между покрытием и основой. Параметры обработки:

- давление сжатого воздуха – не менее 0,5–0,6 МПа;
- расход сжатого воздуха – не менее 1,5 м<sup>3</sup>/мин;
- размер дроби – 70 % размером 1,0 мм и 30 % размером 1,8 мм.

Нанесение покрытия на обрабатываемую поверхность осуществлялось с помощью установки плазменного напыления SX-80 с плазмотроном SG-100, предназначенным для напыления всех видов порошковых и проволочных материалов.

Режимы напыления композиционного покрытия (ПГ-ХН80СР4 + 25 %  $TiO_2$ ):

- напряжение дуги – 30 В;
- сила тока дуги – 550 А;
- дистанция напыления – 0,08–0,09 м;
- расход плазмообразующего газа (аргон) – 22–25 л/мин; расход транспортирующего газа (аргон) – 3–3,5 л/мин;
- фракция порошка – 40–80 мкм;
- толщина покрытия – 260 мкм.

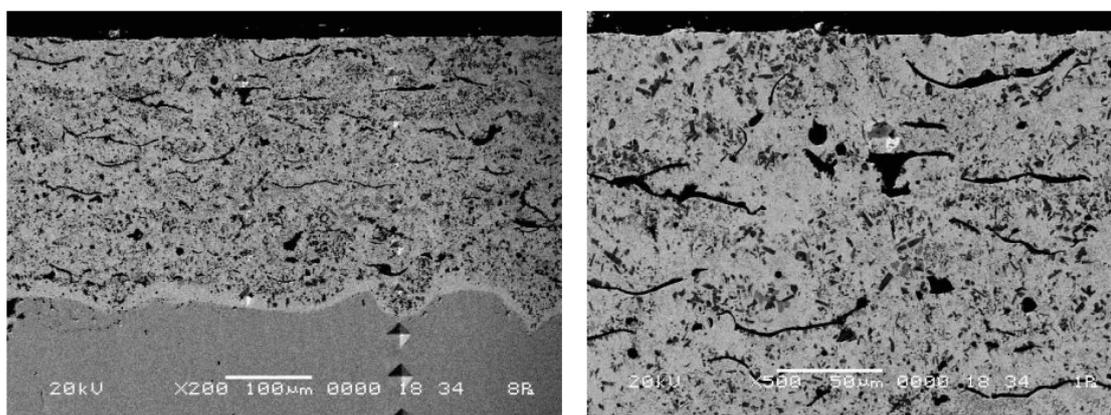
Режимы напыления керамического покрытия (электрокорунд белый):

- напряжение дуги – 38 В;
- сила тока дуги – 700 А;

- дистанция напыления – 0,06–0,08 м;
- расход плазмообразующего газа (аргон) – 22–25 л/мин; расход транспортирующего газа (аргон) – 5–6 л/мин;
- фракция порошка – 10–15 мкм, напыление производится на подслое NiAl, фракция – 40–100 мкм (ПГ-Ю10Н);
- толщина покрытия – 230 мкм.

Исследования структуры и элементный анализ проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония). Исследования твердости производились с помощью портативного твердомера комбинированного действия МЕТ-УДА динамическим методом по шкале Роквелла.

Общий вид микроструктуры композиционных покрытий, полученных плазменным напылением порошковых смесей, представлен на рис. 1. Покрытие имеет плотную слоистую структуру, характерную для самофлюсующихся сплавов, с заметной границей раздела покрытие-основа и темными включениями диоксида титана в виде чешуек, образовавшихся в процессе расплавления частиц диоксида и соударения их с основой и нижележащими слоями покрытия, а также включениями упрочняющих фаз карбидов и боридов хрома. Частицы диоксида титана имеют малую толщину и равномерно распределены в структуре покрытия, количество их пропорционально содержанию упрочняющей фазы в исходной смеси для напыления. Толщина и распределение частиц упрочняющей фазы говорит о достаточном проплавлении всех компонентов напыляемой смеси в плазменной струе. На границе раздела покрытия и основы наблюдается тонкий слой, по данным авторов работы [2], состоящий из твердого раствора на основе никеля, с зоной взаимной диффузии Fe в покрытие, а Ni, Si, B – в основу.



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура плазменного покрытия, состоящего из смеси порошков ПГ-ХР80СР4 и диоксида титана (33 %):  
а – увеличение  $\times 200$ ; б – увеличение  $\times 500$

Коэффициент трения фрикционных покрытий должен быть стабильным и высоким. Показатель износостойкости также обязан удовлетворять эксплуатационным требованиям. Такие покрытия должны обладать хорошей термостойкостью и не должны подвергаться механическим воздействиям. Чтобы покрытие, выполняющее фрикционные функции, не прихватывалось, оно должно наделяться достаточным

адгезионным качеством. Повышение адгезии может быть достигнуто различными способами: подбор подслоя, выбор самофлюсующихся оплавляемых покрытий, что и было сделано в данной работе. Проведен сравнительный анализ двух покрытий, чистой керамики и композиционного никелевого сплава с добавлением керамики. После проведения испытания образцов на стенде было выявлено, что образец с чистым керамическим покрытием из белого электрокорунда марки 25А в сравнении с покрытием из ПГ-ХН80СР4 + 25 %  $TiO_2$  имеет более высокий коэффициент трения, при этом адгезия ниже в 2,2 раза.

При испытаниях образцов тормозных элементов также было выявлено, что, несмотря на относительно невысокую адгезию, изделие с керамическим покрытием можно эксплуатировать. Разрушение покрытия происходит при нагрузках, превышающих более чем в 2 раза нагрузки эксплуатации изделий тормозных механизмов.

#### **Л и т е р а т у р а**

1. Демиденко, Л. М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия / Л. М. Демиденко. – М. : Металлургия, 1979. – С. 216.
2. Структура границы раздела оплавленное покрытие – сталь / Н. А. Руденская [и др.] // Докл. акад. наук. – 2011. – Т. 441, № 4. – С. 495–498.