

## Оценка содержания корунда в износостойком покрытии, полученном электродуговой металлизацией порошковой проволоки с тугоплавкими добавками

М.З. Борисова, Н.Ф. Стручков, Г.Г. Винокуров

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск  
mz\_borisova@yahoo.com*

**Аннотация.** Приведены результаты изучения структуры упрочненного покрытия, полученного методом электродуговой металлизации порошковой проволоки с тугоплавкими модифицирующими добавками  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. Проведены анализ состояния и оценка содержания корунда в износостойких покрытиях. Известно, что покрытия из порошковых проволок характеризуются высокой степенью неоднородности структуры, выделениями избыточных дисперсных и коагулированных фаз, слоистым строением и пористостью. Поэтому остается актуальным вопрос изучения состояния модифицирующих частиц в покрытии с учетом особенностей технологии электродуговой металлизации, для которой свойственна высокая температура дуги, которая может достигать нескольких тысяч градусов, что в свою очередь приводит к выгоранию легирующих элементов. Так как структура покрытий в значительной степени определяет как физико-механические, так и эксплуатационные свойства, то количественный анализ доли тугоплавких включений в покрытиях является актуальной научно-практической проблемой. В работе проведен металлографический и микрорентгеноспектральный количественный анализ макроструктуры износостойкого покрытия и определена доля включений  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Установлено удовлетворительное согласие экспериментальных данных содержания корунда, полученных количественным микрорентгеноспектральным анализом  $\sim 10,88\%$ , с данными, полученными различными аналитическими методами металлографии: линейным методом сечений  $\sim 10,7\%$  и планиметрическим способом с обработкой в MathCad  $\sim 12,2\%$ . Цель настоящей работы – выявление характеристик заполнения порошковой проволоки и содержания включений корунда ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) в структуре износостойкого модифицированного покрытия.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, порошковые проволоки, износостойкие покрытия, модифицирование, структура, корунд.

## Assessment of the Content of Corundum in Wear Resistant Coatings Obtained by Arc Metallization with Cored Wires

M.Z. Borisova, N.F. Struchkov, G.G. Vinokurov

*Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk  
mz\_borisova@yahoo.com*

**Abstract.** The results of studying the structure of the hardened coating obtained by electric arc metallization using cored wire with a refractory modifying additives  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  elaborated in the Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North of SB RAS (Yakutsk). The analysis of corundum state and content in the wear-resistant coatings is carried out. It is known that coatings of flux-cored wires are characterized by a high degree of heterogeneity of the structure, the exuding of excessive particulate and coagulated phases, layered structure and porosity. Therefore, it remains a topical issue of studying the state of the modifier particles in a coating with taking into account the features of the technology of electric arc metallization, which is character-

---

БОРИСОВА Мария Захаровна – к.т.н., с.н.с.; СТРУЧКОВ Николай Федорович – к.т.н., с.н.с.; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с.

*ized by high temperature arc that can reach several thousand degrees, which in turn leads to burnout of alloying elements. Since the structure of coatings largely determines physical-mechanical and operational properties, a quantitative analysis of the fraction of refractory inclusions in the coatings is an important scientific and practical problem. In the work the metallographic and electron microprobe quantitative analysis of the macrostructure of wear-resistant coatings is presented and the proportion of inclusions of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  is determined. Established a satisfactory agreement of the experimental data of the content of corundum, found by quantitative electron microprobe analysis  $\sim 10.88$  per cent, with the data obtained by different analytical methods of metallography: a linear method of sections  $\sim 10.7$  % and planimetric method with the processing in MathCad  $\sim 12.2$  %. The aim of this work is to identify the characteristics of the fill of a cored wire and contents of inclusions of corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) in the structure of a modified wear-resistant coating.*

Key words: electric arc metallization, cored wire, wear-resistant coating, modification, structure, corundum.

### Введение

Восстановление работоспособности деталей машин и механизмов является важнейшей задачей ремонтного производства. Как показывает практика, подавляющее большинство машин (до  $\approx 80\text{--}90$  %) выходит из строя по причине отказа работы узлов трения в результате износа контактных поверхностей. Проблема повышения износостойкости восстановленных деталей, работающих в условиях трения, в настоящее время решается нанесением износостойких порошковых покрытий с использованием газотермических технологий [1–3].

По технико-экономическим показателям наиболее эффективной технологией является электродуговая металлизация порошковых проволок. С её помощью можно наносить покрытия толщиной в несколько миллиметров и при необходимости значительно увеличить геометрические размеры при восстановлении сильно изношенных деталей. Для получения износостойких покрытий используются самофлюсующиеся сплавы на никелевой или кобальтовой основе и их смеси с модификаторами из тугоплавких соединений [4]. При этом обеспечивается образование упрочняющих фаз и улучшение структуры покрытия, что позволяет получать покрытия с высокой износостойкостью. Покрытия, полученные электродуговой металлизацией порошковых проволок, характеризуются крайне неоднородной слоистой структурой, что обусловлено спецификой высокоэнергетических технологических процессов [1–3]. Особенности структуры и физико-механические свойства нанесенных покрытий влияют на износостойкость обработанной поверхности деталей машин и механизмов. Поэтому одной из актуальных задач является изучение состояния модифицирующих частиц в покрытии с учетом технологических свойств порошковой проволоки и нагрева частиц в процессе электродуговой металлизации. Решение данной задачи позволяет определить оптимальный состав порошкового материала с модифицирующими добавками и технологические режимы нанесения покрытия.

Известно, что оксид алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд) является тугоплавким соединением, имеет высокие физико-механические свойства; покрытия с высоким содержанием корунда обладают высокими уровнями твердости, напряжения срыва и электрического сопротивления [5]. Следует отметить, что технологический процесс электродуговой металлизации отличается высокой температурой нагрева порошковых частиц. Поэтому модифицирование порошковых проволок тугоплавкими добавками корунда благоприятно влияет на качество получаемого износостойкого покрытия [6–8].

Цель настоящей работы – выявление характеристик заполнения порошковой проволоки и содержания включений корунда ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) в структуре износостойкого модифицированного покрытия.

### Материалы и методика

#### экспериментальных исследований

В работе проведены исследования на основе изучения структуры покрытия, полученного электродуговой металлизацией порошковой проволоки с тугоплавкими добавками  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН [9]. Модифицированная проволока, содержащая тугоплавкий оксид  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , представляет собой стальную оболочку, наполненную шихтой (рис. 1), состоящей из смеси порошков феррохрома и оксида алюминия следующего состава: 0,47–0,51 % мас. углерода; 2–4 % мас. хрома; 10–15 % мас. оксида алюминия; остальное – железо. Диаметр порошковой проволоки составляет 2,0 мм; начальный коэффициент заполнения шихтой  $\sim 0,35\div 0,4$ .

Покрытия были нанесены на боковую поверхность дисков для испытаний на износ, диаметр составляет 50 мм, высота – 10 мм. Напыление проводилось с помощью промышленной установки электродуговой металлизации ЭДУ-500С с дистанцией напыления ( $L$ )  $\sim 130$  мм при силе тока ( $I$ )  $\sim 280\div 300$  А и напряжении дуги ( $U$ ) 35 В.

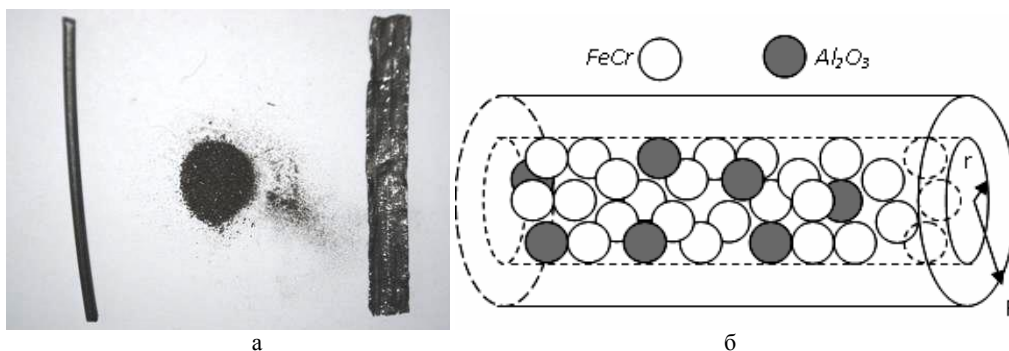


Рис.1. Порошковая проволока: а – фрагмент, шихта, оболочка (развернута); б – схема заполнения шихтой

Для анализа структуры покрытия были изготовлены поперечные металлографические шлифы. В износостойком покрытии исследованы состояния частиц тугоплавких модифицирующих добавок оксида алюминия из шихты порошковой проволоки, размер частиц порошка ~ 40÷100 мкм [5]. Металлографические исследования проводились на микроскопах «Neophot-32» и «Axio Observer». Структура и элементный состав порошковых покрытий исследовались на растровом электронном микроскопе HitachiTM 3030, оснащенный EDS анализатором XFlash 6 фирмы Bruker с возможностью определения содержания химических элементов от бора B(5) до америция Am(95). Обработка экспериментальных данных проведена в электронных таблицах Excel и программной среде MathCad.

### Технологические характеристики порошковой проволоки

Порошковая проволока разработки ИФТПС [9] предназначена для технологии электродуговой металлизации, которая отличается самой высокой температурой нанесения покрытий. Тугоплавкие добавки корунда  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  вследствие высокой температуры плавления практически сохраняются в процессе электродуговой металлизации. Поэтому содержание корунда в покрытии связано с технологической характеристикой заполнения порошковой проволоки. Технологический процесс изготовления порошковой проволоки состоит из последовательно осуществляемых операций, таких как формирования ленты в калибровочных роликах в исходную трубчатую заготовку и дозированного заполнения ее шихтой. Эти операции выполняются в специальном формирующем устройстве с питателем шихты. Дальнейшая калибровка проволоки до заданных размеров производится волочением на прямоточном волочильном стане. Качество изготовления порошковой проволоки определяется коэффициентом заполнения проволоки, т.е. относительным количеством материала в шихте порошковой проволоки  $K_m$  (по массе):

$$K_m = \frac{m_{\text{порошка}}}{m_{\text{проволоки}}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Для нанесения покрытия электродуговой металлизацией порошковая проволока ИФТПС подвергалась уменьшению диаметра волочением через фильеры на стане НПП «Веха-1» (г. Комсомольск-на-Амуре) до диаметра 1,8 мм. Для определения коэффициента заполнения порошковой проволоки проведены измерения масс случайных отрезков порошковой проволоки и соответствующей шихты (рис. 1). Установлено, что коэффициент заполнения порошковой проволоки является стабильным и составляет  $\sim 0,30 \div 0,32$ . Стабильность коэффициента заполнения свидетельствует о высоком качестве изготовления порошковой проволоки ИФТПС. Зависимость массы порошковой шихты от длины порошковой проволоки линейная, порошковая проволока заполнена шихтой практически равномерно по всей длине (рис. 2); относительная погрешность составляет  $\pm 5\%$ .

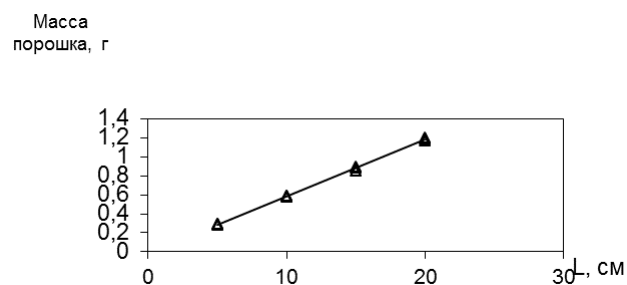


Рис.2. Зависимость массы шихты от длины порошковой проволоки

### Содержание корунда в покрытии

Как известно, корунд обладает рядом положительных свойств, таких как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения, он также является ингибитором роста зерен в металлах [10]. Ранее авторами было показано, что существенное влияние на износостойкость оказывает объемная доля

корунда в покрытии [11]. Микрорентгеноспектральный анализ, проведенный на электронном сканирующем микроскопе, позволил идентифицировать тугоплавкие частицы  $Al_2O_3$  в темных областях структуры покрытия (рис. 3, а). Как видно из элементной карты на рис. 3, б, в данных областях структуры покрытия содержание алюминия является максимальным. Поскольку содержание алюминия в покрытии обусловлено только введением модифицирующих добавок  $Al_2O_3$ , анализом распределения данного элемента можно изучить состояние тугоплавких частиц в износостойком покрытии.

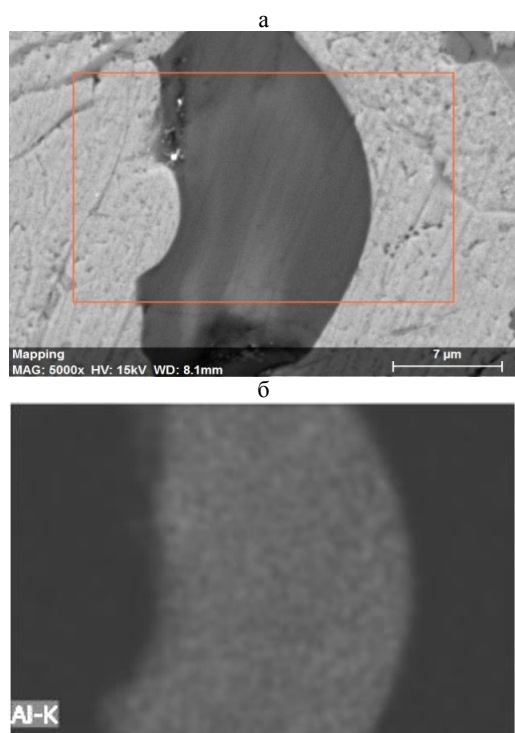


Рис. 3. Частица корунда на шлифе газотермического покрытия с областью анализа (а), карта распределения алюминия (б); увеличение  $\times 5000$

Типичная структура покрытия из порошковой проволоки состоит из неоднородных слоев, толщина которых меняется в широком интервале от 1 до 40 мкм. При электродуговой металлзации тугоплавкие добавки порошкового материала выделяются в виде отдельных нерасплавленных частиц. Включения корунда в напыленных покрытиях обладают высокой степенью анизотропии формы, они сильно вытянуты в горизонтальном направлении, перпендикулярном направлению напыления, длина некоторых из них более  $\sim 200$  мкм, при этом в поперечном направлении частицы сильно сплюснены, их толщина в среднем  $\sim 5$  мкм, максимальная толщина  $\sim 40$  мкм.

Для определения количества включений в работе использован геометрический структурный анализ, позволяющий установить объемную долю составляющих [12]. Представим пространственную структуру покрытия в виде куба, где  $\alpha$  – включения тугоплавкого оксида  $Al_2O_3$ , а  $\beta$  – матрица покрытия (рис. 4). Рассмотрим двумерную структуру, наблюдаемую на передней грани куба. Проведем на этой грани множество равноотстоящих горизонтальных секущих и получим  $z$  узких полос шириной  $\Delta=1/z$  (на рис. 4 показана одна такая секущая АВ). Доля включений на площади шлифа численно равна доле длины секущей, проходящей через включения (линейный метод) [12].

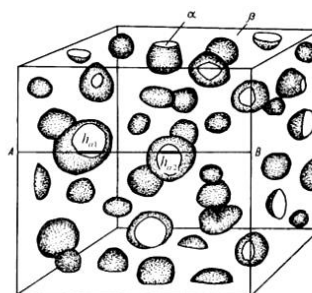


Рис. 4. Пространственная структура, состоящая из включений  $\alpha$  в матрице  $\beta$  [11]

Если считать, что доля включений (содержание) в объеме покрытия равна площади включений на поверхности шлифа, то измерение относительного объема компоненты  $\alpha$  можно заменить измерением и суммированием длин отрезков на единице длины секущей линии на шлифе:

$$\frac{\sum V_{\alpha}}{V} = \frac{\sum h_{\alpha}}{h}, \quad (2)$$

где  $V$  – общий объем куба, а  $h$  – общая длина секущих.

Для определения доли корунда на поверхности шлифа газотермического покрытия были выбраны три случайных участка (рис. 5). На каждом из них был выбран произвольный квадрат площадью  $300 \times 300$  мкм, в котором были проведены 22 секущих в горизонтальном и вертикальном направлениях. Используя соотношение (2), было выявлено содержание включений  $Al_2O_3$  на трёх участках образца, которое составило 10,16; 9,37 и 12,45 %. Усредненное значение 10,7 %, среднее отклонение 1,19 %.

Следующим способом подсчета доли включений оксида алюминия является метод оцифровки изображений и их перевод в бинарный матричный формат с помощью программы MathCad (планиметрический метод, рис. 6).

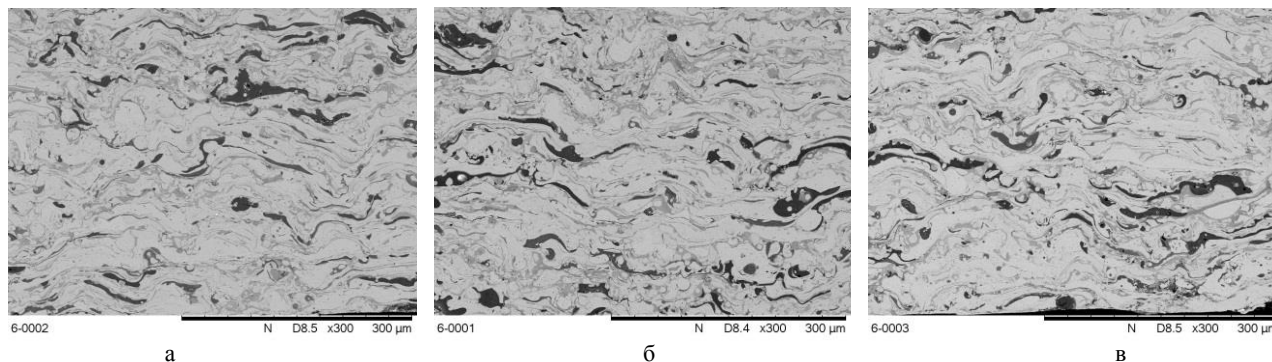


Рис. 5. Структура случайных участков покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками: участки 1 (а), 2 (б), 3 (в), РЭМ; увеличение  $\times 300$

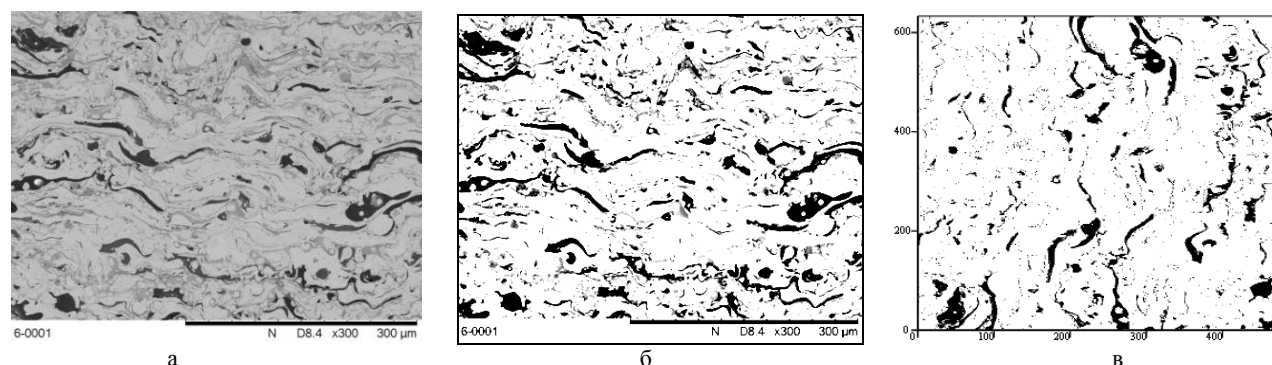


Рис.6. Обработка металлографического изображения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками: а – исходное; б – черно-белое; в – бинарное (повернуто влево)

Бинарный формат представляет собой черно-белое изображение, состоящее из матрицы с элементами 0 и 1; простым суммированием элементов можно определить содержание включений. Поэтому данный подход позволяет с высокой точностью количественно определить размеры, формы и общее содержание частиц корунда в металлографическом изображении покрытия.

При обработке изображений в электронных таблицах Excel было определено содержание тугоплавких частиц  $Al_2O_3$  и характеристики двумерных кластеров изображения структуры. Доля включений, определенная данным методом на трех различных участках шлифа покрытия, составила 10,1; 11,1 и 15,5 %, усредненное значение 12,2 %, среднее отклонение 2,18 %.

Таким образом, наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных данных, полученных линейным методом сечений и планиметрическим способом с обработкой металлографических изображений в MathCad.

Также для оценки содержания корунда был проведен микрорентгеноспектральный анализ образцов с газотермическими покрытиями, с помощью которого выявлено содержание Al на шлифе образцов. На поверхности шлифа были

выбраны три различных произвольных участка, на которых был проведен количественный рентгеноспектральный анализ, основанный на возбуждении рентгеновской флуоресценции определяемых элементов, зависящей от их содержания в образце, и регистрации интенсивности, с помощью которого было определено количество алюминия в образцах покрытия. Содержание алюминия 5,76 %, проведенный стехиометрический расчет показал среднее содержание оксида алюминия  $Al_2O_3$  10,88 %.

### Заключение

1. Определены характеристики заполнения порошковой проволоки с тугоплавкими модифицирующими добавками  $Al_2O_3$ . Коэффициент заполнения порошковой проволоки составляет  $\sim 0,30 \div 0,32$  и является практически стабильным, что свидетельствует о высоком качестве изготовления. Зависимость массы порошковой шихты от длины порошковой проволоки линейная, порошковая проволока заполнена шихтой практически равномерно по всей длине с разбросом  $\pm 5\%$ .

2. Металлографическим и микрорентгеноспектральными методами проведен анализ структуры износостойкого покрытия из порошковой

проволоки с тугоплавкими добавками корунда. В процессе формирования покрытия тугоплавкие добавки корунда выделяются в виде отдельных нерасплавленных частиц. Включения корунда обладают высокой степенью анизотропии формы, они сильно вытянуты в горизонтальном направлении, длина некоторых из них более ~200 мкм, при этом в поперечном направлении частицы сильно сплюснены, их толщина в среднем ~5 мкм, максимальная толщина ~40 мкм.

3. Металлографическим анализом структуры определено содержание (объемная доля) корунда в газотермическом покрытии. Установлено удовлетворительное согласие экспериментальных данных содержания корунда, полученных количественным микрорентгеноспектральным анализом ~10,88 %, с данными, полученными различными аналитическими методами металлографии: линейным методом сечений ~10,7% и планиметрическим способом с обработкой в MathCad ~12,2 %.

#### Литература

1. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
3. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.
4. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1991. 432 с.
5. Чуфистов О.Е., Демин С.Б., Чуфистов Е.А. Микродуговое оксидирование деталей из алюминиевых сплавов в растворах с мелкодисперсным корундом // Упрочняющие технологии покрытия. 2010. №1. С. 16–21.
6. Коржик В.Н., Борисова А.Л., Гордань Г.Н. и др. Особенности структуры покрытий из порошковой проволоки системы Fe-Cr-Al, полученных в условиях сверхзвуковой металлизации // Автоматическая сварка. 2010. №2. С. 33–38.
7. Коробов Ю.С., Филиппов М.А., Табатчиков А.С. и др. Порошковые проволоки Fe-Cr-Al для дуговой металлизации жаростойких покрытий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15, №1. С. 81–84.
8. Korzhik V.N., Borisova A.L., Gordan G.N et al. Peculiarities of structure of coatings of Fe-Cr-Al system flux-cored wire produced under conditions of supersonic electric arc metallization // The Paton welding journal. 2014. №2. P. 31–36.
9. Патент РФ 2048273. Порошковая проволока для получения покрытий / Н.П. Болотина, С.Е. Милохин, В.П. Ларионов, В.Г. Шевченко, А.В. Виноградов. Опубл. 20.11.1995.
10. Смирнов А.Н., Князьков К.В., Радченко М.В. и др. Структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений в износостойких покрытиях, модифицированных наноразмерными частицами  $Al_2O_3$  // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. №4. С. 106–111.
11. Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Федоров М.В., Яковлева С.П. Состав, структура и свойства газотермических покрытий из порошковых проволок и их влияние на процессы изнашивания при трении скольжения // Физическая мезомеханика. 2007. №4. С. 97–105.
12. Томилин А.В. Основные соотношения геометрического структурного анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №4. С. 97–101.

Поступила в редакцию 08.02.2017