

УДК 621.793.72

## **Анализ структуры износостойкого покрытия, полученного 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*

*Одним из наиболее перспективных методов нанесения упрочняющих покрытий на поверхности деталей является электродуговая металлизация порошковых проволок. Технология электродуговой металлизации широко применяется для антикоррозионной защиты металлоконструкций, восстановления изношенных деталей машин, механизмов и т. д. При нанесении покрытия порошковая проволока плавится электрической дугой, и расплавленные частицы ускоряются в направлении поверхности детали высокотемпературным газовым потоком. На последующее формирование упрочняющих покрытий существенное влияние оказывают технологические режимы электродуговой металлизации. Как показывает практика, покрытия, полученные электродуговой металлизацией, характеризуются неоднородной слоистой структурой. Строение порошковых покрытий, распределение, состав и свойства фаз влияют на износостойкость, твердость и прочность обработанной поверхности деталей машин и механизмов. Поэтому необходимо детальное изучение структуры износостойкого покрытия с учетом технологических свойств порошковой проволоки и процессов нагрева частиц при электродуговой металлизации. В данной работе проведен анализ элементов структуры износостойкого покрытия, полученного из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками. Результаты исследования будут полезны при совершенствовании технологии электродуговой металлизации порошковых проволок.*

Ключевые слова: электродуговая металлизация, порошковые проволоки, износостойкое покрытие, структура, фаза, анализ.

## **Analysis of Structure of Wear-Resistant Coating Obtained by Electric Arc Metallization Using Flux-Cored Wire with Refractory Additives**

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

*Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk*

*One of the most promising methods of applying strengthening coatings on the surface of parts is electric arc metallization using flux-cored wires. The technology of arc metallization is widely used for corrosion protection of metal constructions, restoration of worn parts of machines and mechanisms, etc. In the coating process a flux-cored wire is melted by the electric arc, and molten particles are accelerated towards the surface parts with high temperature gas flow. The technological modes of electric arc metallization significantly influence the subsequent formation of strengthening coatings. As the practice shows, the coatings obtained by electric arc metallization are characterized by heterogeneous layered structure. The structure of powder coatings, distribution, composition and properties of the phases determine the wear resistance, hardness and strength of the processed surface of machine parts and mechanisms. That is why it is necessary to study in detail the structure of wear-resistant coatings taking into account technological properties of flux-cored wire, and heating process of the particles during the arc spraying. In this work analysis of elements of the structure of wear-resistant coating obtained by electric arc metallization using*

---

БОРИСОВА Мария Захаровна – к.т.н., с.н. с., mz\_borisova@yahoo.com, bormaria@yandex. ru; СТРУЧКОВ Николай Фёдорович – к.т.н., с.н.с., struchkov\_n@rambler.ru; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с., g.g.vinokurov@iptn.ysn. ru.

*flux-cored wire with refractory additives is conducted. The results of the study will be useful for improvement of the technology of electric-arc metallization using flux-cored wires.*

Key words: electric arc metallization, flux cored wire, wear-resistant coating, structure, phase analysis.

### Введение

В настоящее время электродуговая металлизация порошковых проволок широко используется для нанесения износостойких покрытий на детали машин и механизмов [1–4]. При этом в качестве порошкового материала (шихты) в основном используются самофлюсующиеся сплавы на никелевой или кобальтовой основе и их смеси с модификаторами из тугоплавких металлов, карбидов, нитридов, оксидов и др., которые обеспечивают образование упрочняющих фаз и улучшают структуру покрытия. Покрытия из порошковых проволок характеризуются высокой степенью неоднородности структуры – выделениями избыточных дисперсных и коагулированных фаз, слоистым строением и пористостью. Это обусловлено спецификой технологического процесса, заключающегося в быстропротекающем ( $10^{-3}$ – $10^{-5}$ с) высокотемпературном (до температуры плавления) нагреве порошкового материала и их последующем высокоскоростном охлаждении и застывании.

Физико-механические свойства упрочняющих фаз в структуре покрытий из порошковых проволок существенно влияют на эксплуатационные характеристики обработанной поверхности деталей машин и механизмов. Поэтому исследования структуры порошковых покрытий, распределения, состава и свойств фаз позволяют оценить качество упрочненной поверхности детали и прогнозировать ее физико-механические свойства.

В настоящее время существуют многочисленные работы, посвященные исследованию структуры модифицированных газотермических покрытий, полученных высокоэнергетическими технологиями порошковой металлургии [5–13]. Как показывает анализ исследований, определение химического и фазового состава, неоднородностей структуры газотермических покрытий позволяет оценить объем, распределение и состояние упрочняющих фаз, влияющих на износостойкость обработанной поверхности.

Целью данной работы является анализ структуры износостойкого покрытия, полученного электродуговой металлизацией порошковой проволоки с тугоплавкими добавками корунда.

### Материалы и методы исследования

Порошковая проволока, использованная в работе, представляет собой оболочку из малоуглеродистой стали, заполненную порошковой шихтой с тугоплавкими добавками корунда  $Al_2O_3$

(разработка Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН – ИФТПС) [14].

Модифицированная порошковая шихта состоит из смеси порошков феррохрома и оксида алюминия следующего состава: углерод ~0,47 – 0,51% масс.; хром ~2 – 4% масс.; оксид алюминия ~10 – 15% масс.; железо – остальное. Феррохром и оксид алюминия вводятся для получения в составе покрытия оксидов, обладающих повышенной твердостью и прочностью ( $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$ ).

Покрытия нанесены на установке ЭДУ-500 разработки НПП «Вега-1» (г. Комсомольск-на-Амуре) при следующих технологических режимах электродуговой металлизации (табл. 1).

Таблица 1  
Технологические режимы электродуговой металлизации

№ режима	Напряжение дуги U, В	Ток I, А	Дистанция напыления L, мм
3	30	280–300	130
6	35	280–300	130
9	40	280–300	130

Структура поверхности и элементный состав порошковых покрытий исследовались на растворовом электронном микроскопе HitachiTM 3030, оснащенный EDS анализатором XFlash 6 фирмы Bruker с возможностью определения содержания химических элементов от бора B(5) до амерция Am(95). Количественный рентгеноспектральный анализ прибора основан на возбуждении рентгеновской флуоресценции элементов, зависящей от их содержания в образце, и регистрации интенсивности. Обработка экспериментальных данных проводилась в электронных таблицах Excel и программной среде MathCad.

В процессе электродуговой металлизации расплавление материала осуществляется в результате выделения тепла электрической дугой, горящей между двумя электродными проволоками, а распыление осуществляется струей сжатого воздуха (рис. 1, а).

Температура горения электрической дуги между электродами может достигать ~4000÷5000°C, при этом материал проволоки переходит в жидкую фазу, что обеспечивает образование большого количества мелкодисперсных частиц (рис. 1, б–в). В то же время, при коротком замыкании, температура расплава будет ниже и распыление материала происходит бо-



Рис. 1. Электродуговая металлизация порошковой проволоки: а) схема [2]; б) изготовление порошковой проволоки; в) процесс нанесения покрытий

лее крупными частицами. Эти процессы приводят к тому, что при электродуговой металлизации порошковых проволок формируется особая слоистая (чешуйчатая) структура покрытия (рис. 2).

### Структура и состав покрытия

Как отмечено выше, при электродуговой металлизации порошковых проволок формируется чешуйчатая структура покрытия. Она состоит из отдельных послойно уложенных сплэтов (капель расплава напыляемого материала), растекшихся и затвердевших на подложке [2, 4, 15]. Металлографический анализ поперечных шлифов подтвердил типичную структуру напыленного

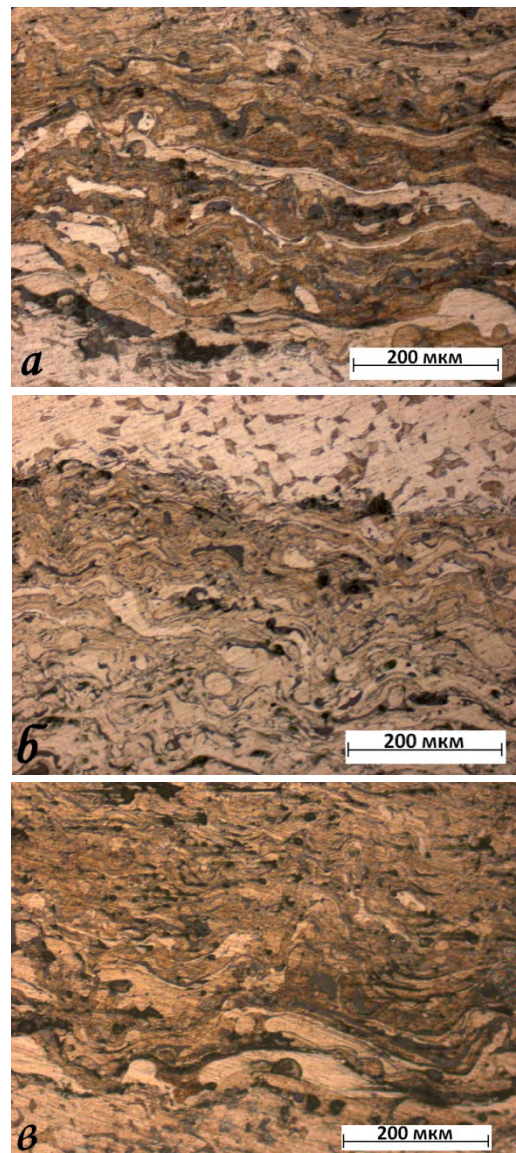


Рис. 2. Микроструктура газотермических покрытий, полученных по режимам 3 (а), 6 (б) и 9 (в)

покрытия, наблюдается неоднородное слоистое строение, толщина слоев меняется в широком интервале  $\sim 1-40$  мкм (рис. 2).

Так как при электродуговой металлизации тугоплавкие добавки порошкового материала выделяются в виде отдельных нерасплавленных частиц, покрытия характеризуются неоднородной микроструктурой, сечения частиц имеют преимущественно лентообразный изогнутый вид. Травление 4% раствором азотной кислоты выявило несколько цветов и оттенков структурных составляющих.

Преобладают фрагменты белого цвета, которые чередуются с темно-серыми и черными включениями различной величины и конфигурации (рис. 2, 3, а), что отражает собой

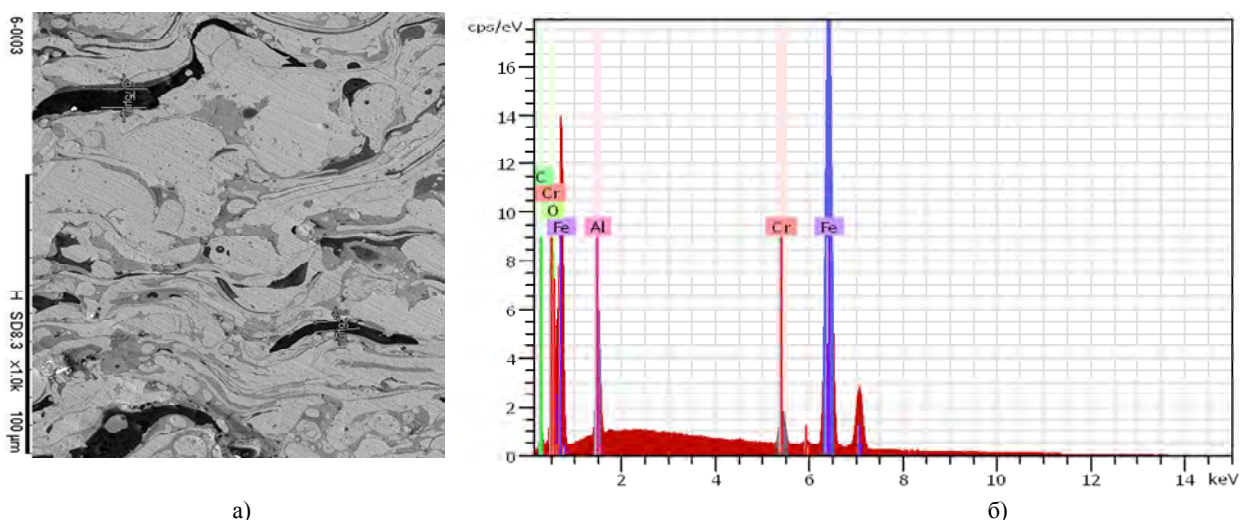


Рис. 3. Структура и состав газотермического покрытия: а) металлографическое изображение, увеличение  $\times 1000$  (РЭМ); б) спектральные линии элементов светлых участков

типичное строение расплоснутых при ударе о подложку сплэтов напыляемого материала.

Актуальным является идентификация элементов структуры с определением их химического состава. Сканирующая электронная микроскопия поверхности покрытия показала, что светлые участки в основном состоят из железа, хрома и углерода (рис. 3, б). Данные металлические фрагменты представляют собой твердый раствор хрома в железе со следующим составом: Fe – 69%, C – 21%, Cr – 4% и O – 6%.

Области серого цвета состоят из Fe – 20%, C – 5%, Cr – 1%, O – 56% и Al – 18%, эти участки (рис. 3, а), скорее всего, являются комплексами карбидов и оксидов, образовавшихся в процессе напыления.

В работе большое внимание уделено исследованию распределения основной упрочняющей фазы – оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), существенно влияющего на износостойкость газотермических покрытий (рис. 4).

Корунд  $Al_2O_3$  обладает рядом положительных свойств, таких как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения, он также является ингибитором роста зерен в металлах [5].

На рис. 4 представлено типичное изображение участка шлифа газотермического покрытия с включением. Из проведенного рентгеноспектрального анализа установлено, что темные включения представляют собой оксид алюминия  $Al_2O_3$  (корунд).

Для оценки расчетных данных по содержанию включений корунда был проведен микро-рентгеноспектральный анализ газотермических покрытий, с помощью которого выявлено содержание Al на шлифе образцов. На поверхности шлифа были выбраны три различных произ-

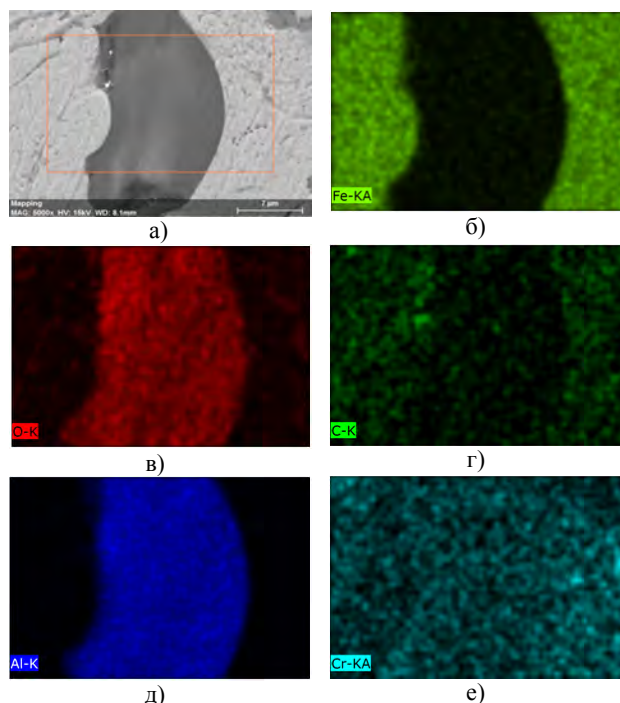


Рис. 4. Изображение включения на шлифе газотермического покрытия при увеличении  $\times 5000$  (а) и карта распределения элементов: железо (б), кислород (в), углерод (г), алюминий (д), хром (е)

вольных участка, на которых был проведен количественный рентгеноспектральный анализ. Измерения содержания алюминия на трех различных участках шлифа составили: 5,21; 6,03 и 6,03 %; среднее значение – 5,76%. Проведенный стехиометрический расчет количества оксида алюминия  $Al_2O_3$  показал содержание корунда в покрытии – 10,88%.

Более подробная оценка содержания корунда в износостойком покрытии требует детального количественного металлографического анализа и является предметом будущих исследований.

### Заключение

1. Проведен металлографический и микрорентгеноспектральный анализ структуры износостойкого покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками корунда. При электродуговой металллизации тугоплавкие добавки порошкового материала выделяются в виде отдельных нерасплавленных частиц; покрытия характеризуются неоднородной микроструктурой, сечения частиц имеют преимущественно лентообразный изогнутый вид. Формируется чешуйчатая структура покрытия, которая состоит из отдельных послойно уложенных сплэтов, растекшихся и затвердевших на подложке.

2. Выявлены и идентифицированы элементы многофазной структуры, формирующейся при быстропотекающих высокотемпературных процессах электродуговой металллизации. Показано, что светлые участки в основном состоят из железа, хрома и углерода и представляют собой твердый раствор хрома в железе со следующим составом: Fe – 69%, С – 21%, Cr – 4% и О – 6%. Области серого цвета состоят из Fe – 20%, С – 5%, Cr – 1%, О – 56% и Al – 18%; эти участки идентифицированы как комплексы карбидов и оксидов, образовавшихся в процессе напыления. Темные области микрорентгеноспектральным анализом определены как включения оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), существенно влияющего на износостойкость газотермических покрытий.

3. Исследования показали, что фазовые включения существенно отличаются по химическому составу и конфигурации, поэтому физико-механические и эксплуатационные свойства газотермических покрытий из порошковых проволок могут определяться не только общим объемным содержанием упрочняющих фаз, но и их распределением по сечению покрытия.

Исследования в работе проведены на оборудовании ЦКП «Станция натуральных испытаний» Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН.

### Литература

1. *Herman H.* Plasma Spray Deposition Processes // *MRS Bull.* – 1988. – Vol. 13. – N. 12. – P. 60–67.
2. *Satyabati Das.* Processing and tribological behaviour of flyash-illmenite coating. Master's thesis. Department of Metallurgical & Materials Engineering National Institute of Technology. – Rourkela, 2008.
3. *Бледнов В.А.* Моделирование формирования слоистой структуры и пористости плазменных порошковых покрытий с учетом изменяемой топологии поверхности при напылении / В.А. Бледнов, В.И. Иорданов, О.П. Солоненко // *Изв. Том. политехн. ун-та.* – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 82–87.
4. *Бороненков В.Н.* Основы дуговой металллизации. Физико-химические закономерности /

В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – 268 с.

5. *Структурно-фазовое* состояние и поля внутренних напряжений в износостойких покрытиях, модифицированных наноразмерными частицами  $Al_2O_3$  / А.Н. Смирнов, К.В. Князьков, М.В. Радченко и др. // *Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та.* – 2012. – № 4. – С. 106–111.

6. *Кудинов В.В.* Исследование процесса формирования макро- и микроструктуры частиц газотермических покрытий / В.В. Кудинов, В.И. Калита, О.Г. Коптева // *Физика и химия обработки материалов.* – 1992. – № 4. – С. 88–92.

7. *Защитные* покрытия на жаропрочных никелевых сплавах: (обзор) / И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк, М.А. Тепленко и др. // *Порошковая металлургия.* – 2000. – № 9/10. – С. 12–27.

8. *Высокоскоростное* газопламенное напыление порошковых алюминидовых защитных покрытий / Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель, В.Х. Кадиров и др. // *Порошковая металлургия.* – 2001. – № 3/4. – С. 30–37.

9. *Калита В.И.* К вопросу о механизме формирования аморфной структуры в металлических сплавах при плазменном напылении / В.И. Калита, Д.И. Комлев // *Металлы.* – 2003. – № 6. – С. 30–37.

10. *Калита В.И.* Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами / В.И. Калита // *Физика и химия обработки материалов.* – 2005. – № 4. – С. 46–57.

11. *Тополянский П.А.* Исследования свойств нанопокртия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения / П.А. Тополянский, Н.А. Соснин, С.А. Ермаков и др. // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2011. – № 2. – С. 28–34.

12. *Воронкова М.Н.* Технология нанесения упрочняющих покрытий плазменным напылением при восстановлении деталей оборудования промышленности строительных материалов / М.Н. Воронкова, Н.Н. Потапов // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2009. – № 5. – С. 15–17.

13. *Аренсбургер Д.С.* Покрытия, напыленные высокоскоростным газотермическим методом / Д.С. Аренсбургер, С.М. Зимаков, П.А. Кулу, М.А. Оявиир // *Порошковая металлургия.* – 2001. – № 3/4. – С. 38–47.

14. *Пат. 2048273* Российская Федерация. Порошковая проволока для получения покрытий. – № 93019989/02 ; заявл. 14.04.1993 ; опубл. 20.11.1995, Бюл. № 32. – 3 с.

15. *Винокуров Г.Г.* Состав, структура и свойства газотермических покрытий из порошковых проволок и их влияние на процессы изнашивания при трении скольжения / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков, М.В. Федоров, С.П. Яковлева // *Физическая мезомеханика.* – 2007. – № 4. – С. 97–105.

*Поступила в редакцию 24.03.2016*