

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение

УДК 621.793.72

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-2-11

Формирование макроструктуры и пористости износостойких модифицированных порошковых покрытий

Н.Ф. Стручков, Г.Г. Винокуров

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия
struchkov_n@rambler.ru*

Аннотация. Исследована макроструктура износостойких порошковых покрытий с модифицирующими добавками четырех видов – корунда Al_2O_3 , вольфрама W , тантала Ta и редкоземельного концентрата Томторского месторождения РС(Я). Характерной особенностью макроструктуры модифицированных порошковых покрытий является ее слоистое строение, которое существенно влияет на формирование открытой пористости. Методом гидростатического взвешивания оценены уровни открытой пористости модифицированных порошковых покрытий. Показано, что открытая пористость газотермического покрытия также зависит от технологических режимов его получения и содержания модификаторов. На основе статистического моделирования формирования слоистой макроструктуры порошковых покрытий предложено теоретическое распределение пористости порошкового покрытия на гладкой подложке.

Ключевые слова: порошковая проволока, порошковое покрытие, макроструктура, слои, пористость, гидростатическое взвешивание, статистическое моделирование

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-2-11

Formation of the macrostructure and porosity of the wearproof modified powder coatings

N.F. Struchkov, G.G. Vinokurov

*V.P. Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia
struchkov_n@rambler.ru*

Abstract. The macrostructure of wearproof powder coatings with the modifying additives of four types are investigated: corundum Al_2O_3 , tungsten W , tantalum Ta , and a rare-earth concentrate from the Tomtor-sky field in the Republic of Sakha (Yakutia). It is shown that a characteristic feature of the macrostructure of the modified powder coatings is their layered nature, which has a substantial effect on the formation of open porosity. The levels of open porosity of the modified powder coatings were estimated by means of hydrostatic weighing. It is shown that the open porosity of the gas-thermal coating is also dependent on the technological modes of its preparation and on the concentrations of modifying agents. A theoretical distribution of the porosity of powdered coating on a smooth substrate is proposed on the basis of the statistical modeling of the formation of layered macrostructure of powder coatings.

Key words: powder wire, powder coating, macrostructure, layers, porosity, hydrostatic weighing, statistical modeling.

Введение

Как показывает мировая практика, для упрочнения и восстановления деталей техники эффективно применяются технологии газотермического напыления порошковых покрытий [1–3]. При этом для получения износостойких покрытий в основном используются промышленные самофлюсующиеся сплавы на никелевой или кобальтовой основе, а также их смеси с модификаторами из тугоплавких металлов, карбидов, нитридов, оксидов и др. Данные порошковые материалы обеспечивают образование упрочняющих фаз и улучшают структуру покрытия. Поэтому модифицированные износостойкие покрытия характеризуются высокой степенью неоднородности структуры – выделениями избыточных дисперсных и коагулированных фаз, слоистым строением и пористостью.

Форма частиц и поровое пространство между ними составляют понятие *макроструктуры* порошкового покрытия. Одной из основных характеристик макроструктуры порошковых покрытий является их пористость с размерами пор в весьма широком диапазоне $\sim 10^{-8}$ – 10^{-4} м [1, 4–6]. В износостойких покрытиях высокий уровень пористости с крупными порами ухудшает характеристики прочности и твердости, что приводит к снижению износостойкости. С другой стороны, при трении скольжения смазочное вещество, заполняющее мелкие поры покрытия, равномерно распределяется по контактным поверхностям трения. Это приводит к положительному эффекту износостойкости – снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Таким образом, вышеприведенный широкий диапазон размеров пор обеспечивает большие возможности управления физико-механическими и триботехническими свойствами износостойких покрытий.

Этим определяется несомненная актуальность исследования формирования пористой макроструктуры порошкового покрытия. Для измерения открытой пористости порошковых материалов и покрытий широко применяется метод гидростатического взвешивания [7–11], основными достоинствами которого являются общая простота методики и доступность испытательного оборудования.

Целью данной работы является установление закономерностей формирования пористой макроструктуры износостойких порошковых покрытий с модифицирующими добавками.

Материалы и методика экспериментальных исследований

Объектами аналитического исследования в работе являются износостойкие покрытия, полученные при различных режимах электродуговой металлизации порошковой проволоки с тугоплавкими добавками корунда Al_2O_3 (разработка Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН) [12]. Также исследовались покрытия из опытных порошковых проволок с модифицирующими добавками трех видов: вольфрама W, тантала Ta и комплексного концентрата Томторского месторождения редкоземельных металлов Республики Саха (Якутия).

Порошковая проволока ИФТПС СО РАН, содержащая тугоплавкий оксид Al_2O_3 , состоит из стальной оболочки с шихтой из смеси порошков феррохрома и оксида алюминия следующего состава, масс. %: углерод 0,47–0,51; хром 2–4; оксид алюминия 10–15; железо – остальное [12]. Диаметр порошковой проволоки равен 2,0 мм; начальный коэффициент заполнения составляет $\sim 0,35$ – $0,4$. Покрытия с тугоплавкими добавками корунда Al_2O_3 нанесены на установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 (ООО «Вежа-1», г. Комсомольск-на-Амуре) при следующих технологических режимах электродуговой металлизации: ток дуги $I = 280$ – 300 А, дистанция напыления $L = 130$ мм, напряжения дуги составляли $U = 30, 35$ и 40 В.

В опытных порошковых проволоках с модифицирующими добавками вольфрама W и тантала Ta варьировалось содержание модификаторов в шихте – 0,1, 0,3 и 1 масс. %; основу порошкового материала представляет промышленный порошок ПГСП-4 системы Ni–Cr–B–Si. Опытные порошковые проволоки имеют диаметр 1,92 мм. Покрытия с модифицирующими добавками вольфрама W и тантала Ta нанесены также на установке «ЭДУ-500» при технологических режимах: ток дуги $I = 200$ – 220 А, напряжение дуги $U = 38$ – 40 В, дистанция напыления $L = 150$ – 180 мм; толщина покрытий составляет 0,8–1,2 мм. Для проведения измерений были изготовлены цилиндрические и прямоугольные образцы с покрытием на торцевой стороне.

Состав опытных порошковых проволок с модифицирующими добавками комплексного концентрата Томторского месторождения редкоземельных металлов приведен в табл. 1. Следует отметить, что контрольный состав проволоки № 3

Состав порошковых проволок с редкоземельными модифицирующими добавками, масс. %

Table 1

The composition of flux cored wires with modifying rare earth additives, mass %

Номер состава	Порошок ПГСР-4	Концентрат Томторского месторождения	Модификатор SiC	Лигатура ФХБ-1	Порошок Al_2O_3
1	41,24	8,25	0	41,24	9,28
2	45,05	1,8	3,6	40,54	9,01
3	34,6	--	18,69	38,06	8,65

не имеет модификаторов редкоземельного концентрата. Диаметр опытных порошковых проволок также равен 2,0 мм; коэффициент заполнения составляет $\sim 0,25-0,3$. Покрытия нанесены также на установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 при следующих технологических режимах металлизации: ток дуги $I = 200-300$ А, напряжение $U = 40-70$ В, давление распыляемого воздуха $P = 0,7-0,75$ МПа, дистанция напыления $L = 150$ мм. Покрытия были нанесены на полированные стальные подложки для последующего отделения. Полученные образцы покрытий не подвергались дополнительной термической обработке.

Определение открытой пористости газотермических покрытий проводилось методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 9.304-87 [8]. При использовании данного метода основным фактором, определяющим его точность, является степень насыщения открытых пор покрытия рабочей жидкостью. Поэтому в работе в качестве рабочей пропитывающей жидкости открытых пор покрытия был выбран керосин. Применение керосина, обладающего высокой проникающей способностью, позволяет исключить дополнительные операции пропитки, необходимые при использовании других жидкостей [7-10].

Открытая пористость определялась по следующей формуле [8]:

$$P = \frac{(m_2 - m)\rho_0}{(m_2 - m_1)\rho_0 - m_0\rho_{ж}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m – масса сухого образца с покрытием на воздухе; m_0 – масса подложки; m_1 – масса пропитанного образца с покрытием в жидкости; m_2 – масса пропитанного образца с покрытием на воздухе; ρ_0 – плотность подложки; $\rho_{ж}$ – плотность пропитывающей жидкости (керосина). Следует отметить, что для покрытий с редкоземельными модифицирующими добавками, отде-

ленных от полированной подложки, в формуле (1) имеем $m_0 = 0$.

Металлографический анализ структуры износостойких порошковых покрытий проведен на микроскопах «Neophot-32» и «Axio Observer D1m». Микроструктурные исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе ТМ3030 («Hitachi», Япония). Взвешивание образцов на воздухе и в жидкой среде проведены на электронных весах с точностью до 0,0001 г.

Макроструктура и пористость порошковых покрытий

Как отмечено выше, одной из количественных характеристик макроструктуры порошковых покрытий является их пористость. По механизму образования элементы пористости макроструктуры порошкового покрытия разделяются на следующие основные виды [1]:

1. Микро- и мезопоры, образующиеся вследствие неплотной укладки частиц в слой, формируемый за один проход напыления. К этому классу относятся наиболее крупные поры порошкового покрытия, их геометрия может быть разнообразной.

2. Поры, образующиеся вследствие взаимодействия частиц порошкового материала с газовой средой: в покрытии могут локализоваться пустоты, соответствующие по своему размеру крупным микропорам.

3. Поры, образующиеся вследствие диспергирования (разбрызгивания) частиц при соударении с подложкой и формируемым покрытием; они имеют сложную форму.

4. Микро- и мезопоры, возникающие вследствие дендритной кристаллизации расплавленных частиц порошкового материала.

5. Трещины, микротрещины и субмикротрещины, которыми зачастую пронизаны частицы порошкового материала.

Таким образом, наличие пор в порошковых покрытиях отражается на особенностях их макроструктуры (рис. 1). При этом поры видов 1 и 3 в основном определяют уровень открытой пористости порошкового покрытия.

На рис. 1, *а, б* приведены характерные макроструктуры покрытий с тугоплавкими добавками Al_2O_3 , полученных при различных технологических режимах металлизации $U = 30$ и 35 В.

Следует отметить, что модифицирующие добавки корунда являются тугоплавкими, температура плавления Al_2O_3 составляет 2050°C . Поэтому в процессе электродуговой металлизации частицы корунда (особенно крупные) только частично расплавляются (см. рис. 1, *а*). Как видно из рис. 1, *а, б*, в макроструктуре покрытий присутствуют оксидные пленки и мелкие поры на границах частично расплавленных и деформиро-

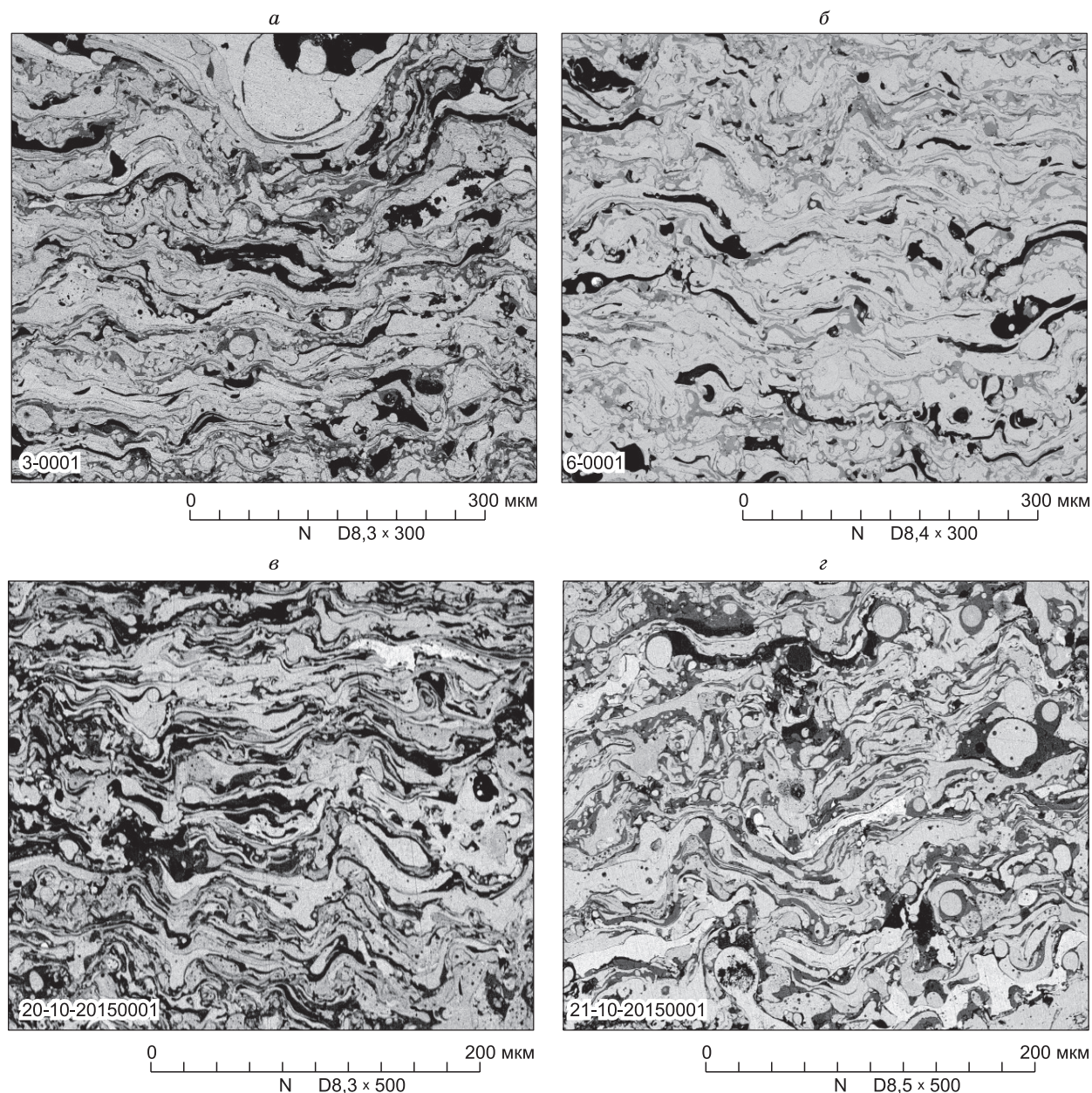


Рис. 1. Макроструктура покрытий с модифицирующими добавками: *а* – Al_2O_3 , $U = 30$ В; *б* – Al_2O_3 , $U = 35$ В; *в* – W, 1 масс.%; *з* – Ta, 0,1 масс. %.

Fig. 1. A macrostructure of coating with the modifying additives: *а* – Al_2O_3 , $U = 30$ В; *б* – Al_2O_3 , $U = 35$ В; *в* – W, 1 % of mass; *з* – Ta, 0,1 % of mass.

ванных частиц (сплэтов); также наблюдаются более крупные поры неправильной формы, образованные на границах нескольких частиц, вследствие их неплотной упаковки (вышеприведенные виды 1 и 3). Высокий уровень пористости покрытий определяется большими размерами таких пор сложной формы (см. рис. 1, *a*). Следует отметить, что формирование таких пор (с очень широким диапазоном размеров) во всем объеме покрытия приводит к их выходу на поверхность, т.е. образованию открытой пористости [1].

На рис. 1, *b*, *г* приведены изображения структуры покрытий с модифицирующими добавками

вольфрама W и тантала Ta. Видно, что газотермические покрытия обоих видов имеют неоднородную слоистую структуру, также состоят из наложенных друг на друга расплавленных частиц порошковой проволоки с прослойками оксидных пленок между ними. Крупные поры, как и в случае покрытия с модифицирующими добавками корунда (см. рис. 1, *a*, *б*), образуются на границах и стыках наложенных расплавленных и оплавленных частиц (см. рис. 1, *в*, *г*).

На рис. 2 приведены характерные макроструктуры покрытий с редкоземельными модифицирующими добавками. Во всех покрытиях также

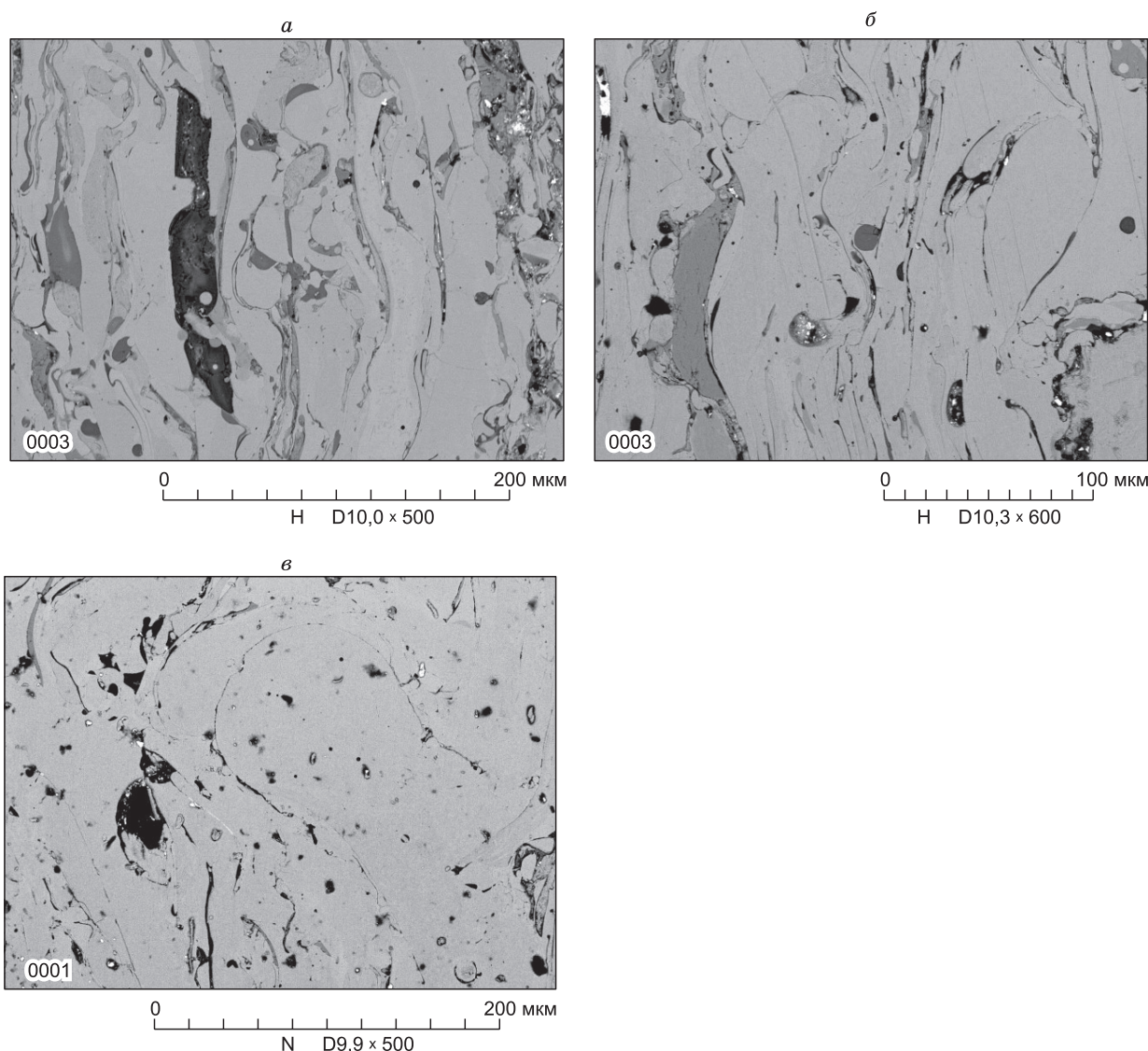


Рис. 2. Макроструктура покрытий с редкоземельными модифицирующими добавками и контрольного образца; составы: *a* – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3 (составы приведены в табл. 1).

Fig. 2. A macrostructure of coating with the rare-earth modifying additives and a control sample; compositions: *a* – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3.

**Результаты измерения
открытой пористости газотермических покрытий с модифицирующими добавками**

Покрытие, модификатор	P_o , %	Покрытие, модификатор	P_o , %
Al_2O_3 , режим $U = 30$ В	3,02	Ta, 0,1 %	7,85
Al_2O_3 , режим $U = 35$ В	1,64	Ta, 0,3 %	5,94
Al_2O_3 , режим $U = 40$ В	1,97	Ta, 1 %	6,73
W, 0,1 %	4,87	РЗМ состав № 1	7,36
W, 0,3 %	8,67	РЗМ состав № 2	9,56
W, 1 %	7,48	РЗМ состав № 3	6,19

наблюдается наличие слоев из оксидных пленок и небольших пор на границах деформированных частиц (сплэтов) и крупных пор различной формы, образованных на границах нескольких частиц, вследствие их неплотной укладки.

Таким образом, появление пор видов 1 и 3 крупных размеров, в основном, отражается на формировании слоистой макроструктуры порошкового покрытия, которая определяет уровень его открытой пористости.

В табл. 2 приведены результаты измерения открытой пористости P_o газотермических покрытий с модифицирующими добавками корунда, тантала, вольфрама и редкоземельных соединений (РЗМ).

Как показывают экспериментальные исследования, наименьшее значение 1,64 % открытой пористости наблюдается у покрытия с корундом Al_2O_3 , полученного при режиме: ток $I = 280$ – 300 А, напряжение $U = 35$ В, дистанция напыления $L = 130$ мм. При незначительном снижении напряжения дуги ($U = 30$ В) открытая пористость покрытия увеличивается практически вдвое, рост напряжения дуги до 40 В также повышает пористость до ≈ 2 % (см. табл. 2). Таким образом, выявлено, что уровень пористости газотермического покрытия крайне чувствителен к изменению технологических режимов его получения.

Измерениями пористости установлено, что при увеличении содержания модифицирующих добавок вольфрама W и тантала Ta от 0,1 % до 1 масс. %, пористость обоих видов покрытий изменяется немонотонным образом (см. табл. 2). Для покрытий с вольфрамом уровень пористости составляет от $\approx 4,9$ до $\approx 8,7$ %, пористость покрытий с танталом – от $\approx 5,9$ до $\approx 7,8$ %. Как видно из табл. 2, уровень открытой пористости газотермических покрытий также немонотонно зависит от содержания редкоземельных модифи-

каторов. Наименьшее среднее значение 6,19 % открытой пористости наблюдается у покрытия без редкоземельных добавок (состав № 3). Следует отметить, что полученные результаты качественно согласуются с данными других работ (от ≈ 1 до ≈ 20 %) [1, 7, 9, 10].

Статистическое описание формирования пористой макроструктуры

В настоящее время для описания случайной макроструктуры порошковых покрытий широко используются методы статистического моделирования [4–6]. Как установлено металлографическим анализом, общей характерной особенностью случайной макроструктуры порошковых покрытий является ее слоистое строение (см. рис. 1, 2). С учетом этого, ранее авторами была построена статистическая модель формирования макроструктуры порошковых покрытий со следующими предположениями [13]:

1. Локальная плотность слоя покрытия является случайной функцией от расстояния слоя до подложки.

Под влиянием случайных факторов формирования покрытия при одних и тех же макроскопических параметрах режима напыления (ток дуги, дистанция напыления и т. д.) существует бесчисленное множество реализаций случайной функции плотности слоев. Усреднением их при фиксированном значении расстояния слоя от основы можно получить значение плотности определенного слоя покрытия.

2. Изменение локальной плотности слоев покрытия описывается случайным марковским процессом.

При данном подходе учитывается основной механизм порообразования с видами открытых пор 1 и 3 наиболее крупных размеров – вследствие неплотной упаковки и разбрызгивания ча-

стиц порошкового материала. Тогда следует предположить, что локальная плотность образующегося n -го слоя определяется локальной плотностью только предыдущего $(n - 1)$ -го слоя, сама же реализованная локальная плотность n -го слоя будет определять локальную плотность последующего $(n + 1)$ -го слоя и т. д. Таким образом, изменение локальной плотности от слоя к слою можно рассматривать как случайный марковский процесс.

Как известно, по локальной безразмерной плотности усреднением по реализациям можно определить среднюю плотность (или пористость) слоя. В данной работе расчеты средней пористости покрытия проведены для покрытия на гладкой подложке. Дело в том, что в этом случае обеспечивается более равномерное растекание расплава частиц на гладкой подложке [1]. Это обеспечивает, как показывают экспериментальные исследования, что при газотермическом напылении на гладкую подложку вблизи нее практически достигается плотность сплошного материала. Для данного случая развитием статистического подхода можно получить теоретическое выражение $По_T$ для безразмерной средней пористости слоев покрытия [13]:

$$По_T = \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{B\pi^2(2N+1)^2x}{rT^2}\right)}{(2N+1)^2} \right], \quad (2)$$

где x – расстояние слоя до подложки, ρ_T – плотность порошкового материала, B – постоянная величина, определяемая из эксперимента [13].

Вычисления средней пористости слоев покрытия на гладкой подложке по выражению (2) в работе проведены с использованием MathCad. Качественные виды кривых средней пористости слоев покрытия на гладкой подложке представлены на рис. 3; расчеты проведены при различных значениях параметра B .

Как видно из графиков, у гладкой подложки пористость слоя исчезает, с удалением от подложки средняя пористость слоев монотонно возрастает.

В заключение проведем краткий анализ выражения (2) для средней пористости слоев покрытия на гладкой подложке. Как и следовало ожидать, у гладкой подложки имеем плотность сплошного материала:

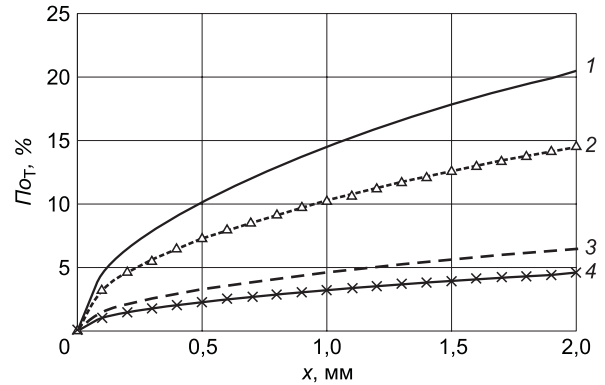


Рис. 3. Средняя пористость слоев порошкового покрытия на гладкой подложке:

1 – $B = 10^9 \text{ кг}^2/\text{м}^7$; 2 – $B = 5 \cdot 10^8 \text{ кг}^2/\text{м}^7$; 3 – $B = 10^8 \text{ кг}^2/\text{м}^7$; 4 – $B = 5 \cdot 10^7 \text{ кг}^2/\text{м}^7$.

Fig. 3. Average porosity of layers coating on a smooth substrate:

1 – $B = 10^9 \text{ kg}^2/\text{m}^7$; 2 – $B = 5 \cdot 10^8 \text{ kg}^2/\text{m}^7$; 3 – $B = 10^8 \text{ kg}^2/\text{m}^7$; 4 – $B = 5 \cdot 10^7 \text{ kg}^2/\text{m}^7$.

$$\lim_{x \rightarrow 0} По_T = 0.$$

В этом можно убедиться, учитывая, что в выражении (2) при $x = 0$ сумма второго слагаемого в виде числового ряда равна $1/2$ [14]. Как видно из формулы (2), также существует предельное значение средней пористости у поверхности покрытий больших толщин:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} По_T = 1/2.$$

Следует добавить, что для расчета значений общей пористости $По$ покрытий, приведенных в табл. 2, необходимо усреднение зависимости (2) интегрированием по толщине покрытия. Тогда значения параметра B можно оценить из анализа экспериментальных данных открытой пористости покрытий, приведенных в табл. 2.

Заключение

1. Проведен анализ макроструктуры износостойких порошковых покрытий с модифицирующими добавками корунда Al_2O_3 , вольфрама W , тантала Ta и редкоземельного концентрата Томторского месторождения РС(Я). Установлено, что характерной особенностью макроструктуры порошковых покрытий является ее слоистое строение. В макроструктуре всех покрытий наблюдается наличие слоев из оксидных пленок и мелких пор на границах частично расплавленных и деформированных частиц порошкового материала. Более крупные поры случайной формы образуются

ся на границах нескольких частиц, вследствие их диспергирования и неплотной укладки; они определяют уровень открытой пористости покрытий.

2. Методом гидростатического взвешивания установлены уровни открытой пористости модифицированных порошковых покрытий. Показано, что уровень открытой пористости газотермического покрытия существенно зависит от изменений технологических режимов его получения и содержания модификаторов. Наименьшее значение 1,64 % открытой пористости наблюдается у покрытия с добавками корунда Al_2O_3 . Для покрытий с вольфрамом W уровень открытой пористости составляет от $\approx 4,9$ до $\approx 8,7$ %; открытая пористость покрытий с танталом Ta – от $\approx 5,9$ до $\approx 7,8$ %. Для покрытий с редкоземельными модификаторами открытая пористость составляет 7,36 и 9,56 % при содержании концентрата 8,25 и 1,8 масс. % соответственно.

3. Развитием статистического подхода для описания слоистой макроструктуры предложено теоретическое выражение для средней пористости слоев покрытия на гладкой подложке. При данном подходе учитывается основной механизм порообразования с видами открытых пор наиболее крупных размеров – вследствие неплотной упаковки и диспергирования частиц порошкового материала. Показано, что пористость слоя на гладкой подложке близка к нулю, с удалением от подложки средняя пористость слоев покрытия монотонно возрастает.

Литература

1. Кудинов В.В., Пекшеев П.Ю., Белащенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
2. Боронов В.Н., Коробов Ю.С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург.: Изд-во Урал. ун-та, 2012. -268 с.
3. Архипов В.Е. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. М.: Изд-во Красанд, 2017. 239 с.
4. Гнедовец А.Г., Калита В.И. Модель формирования макроструктуры покрытий при плазменном напылении // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 1. С. 30–39.
5. Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact // Phys.Fluids. 1999. V. 11. P. 1406–1417.
6. Mostaghimi J., Pasandideh-Fard M., Chandra S. Dynamics of splat formation in plasma spray coating process. Plasma Chem. Plasma Proces. 2002. V. 22, N 1. P. 59–84.
7. Исакаев Э.Х., Мордынский В.Б., Подымова Н.Б., Сидорова Е.В., Школьников Е.И. Определение пори-

стости газотермических покрытий // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 5. С. 71–77.

8. ГОСТ 9.304-87. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. введ. 01.07.89. М.: Изд-во стандартов, 1988. 10 с.

9. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М.: Мир, 2004. 384 с.

10. Рогожкин В.М., Акимов Л.В., Смирнов Ю.В. Определение пористости напыленных покрытий методом гидростатического взвешивания // Порошковая металлургия. 1980. № 9 (213). С. 42–46.

11. Газотермическое напыление: учеб. пособие / кол. авторов: под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.

12. Порошковая проволока для получения покрытий : патент 2048273 Рос. Федерация. № 93019989/02; заявл. 14.04.1993; опубл. 20.11.1995, Бюл. № 32. 3 с.

13. Vinokurov G., Popov O. Statistical approaches to describe the macrostructure formation and wear of powder coatings and materials obtained by high-energy methods. Moscow: Academia Publishers, 2013. 160 p.

14. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, рядов и произведений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 1182 с.

References

1. Kudinov V.V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V.E., Solonenko O.P., Safiullin V. A. Naneseenie pokrytiy plas-moy. M.: Nauka, 1990. 408 p.
2. Boronov V.N., Korobov Yu.S. Osnovy dugovoy metallizatsii. Fiziko-khimicheskie zakonomernosti [Bas-es of arc metallization. Physical and chemical regulari-ties]. Ekaterinburg.: Izd-vo Ural. Un-ta, 2012. 268 p.
3. Arkhipov V.E. Gazodinamicheskoye napyleniye. Struktura i svoystva po-krytiy. M.: Krasand. 2017. 239 p.
4. Gnedovets A.G., Kalita V.I. Model formirovaniya makrostruktury pokrytiy pri plazmennom napylenii // Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. 2007. N 1. P. 30–39.
5. Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. On a three-dimensional volume tracking model of droplet im-pact // Phys.Fluids. 1999. V. 11. P. 1406–1417.
6. Mostaghimi J., Pasandideh-Fard M., Chandra S. Dynamics of splat formation in plasma spray coating process. Plasma Chem. Plasma Proces. 2002. V. 22, N 1. P. 59–84.
7. Isakayev E.Kh., Mordynsky V.B., Podymova N.B., Sidorova E.V., Shkol'nikov E. I. Opredelenie poristosti gazotermicheskikh pokrytiy // Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. 2010. N 5. P. 71–77.
8. State standart GOST 9.304-87. Pokrytiya gazoter-micheskie. Obshchie trebovaniya i metody kontrolya. M.: Izd-vo. standartov, 1988. 10 p.
9. Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sinde-ev V.I. Metody issledovaniya materialov: Struktura, svoystva i protsessy naneseeniya neorganicheskikh pokrytiy. M.: Mir, 2004. 384 p.

10. Rogozhkin V.M., Akimov L.V., Smirnov Yu.V. Opredelenie poristosti napylenykh pokrytiy metodom gidrostaticheskogo vzveshivaniya // Porosh. Metallur. 1980. N 9 (213). P 42–46.
11. Gazotermicheskoe napylenie: uchebnoe posobie / Baldaev L.Kh. (ed.). M.: Market DS, 2007. 344 p.
12. RF Pat. No. 2048273. Poroshkovaya provoloka dlya polucheniya pokrytiy [A powder wire for receiving coatings]: Appl. 20.11.1995, Bul. No. 32. 3 p.
13. Vinokurov G., Popov O. Statistical approaches to describe the macrostructure formation and wear of powder coatings and materials obtained by high-energy methods. – Moscow: Academia Publishers, 2013. – 160 p.
14. Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. Tablitzы integralov, ryadov i proizvedenii. SPb.: BKhV-Peterburg, 2011. 1182 p.

Поступила в редакцию 01.03.2019

Принята к публикации 25.06.2019

Об авторах

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, г. Якутск, ул. Октяб́рская, 1, Россия,
<https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, struchkov_n@rambler.ru;

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, г. Якутск, ул. Октяб́рская, 1, Россия,
<https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru.

About authors

STRUCHKOV Nikolai Fedorovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS, 1 Oktyabrskaya Str., Yakutsk, 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, struchkov_n@rambler.ru;

VINOKUROV Gennadiy Georgievich, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru.

Информация для цитирования

Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. Формирование макроструктуры и пористости износостойких модифицированных порошковых покрытий // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019, том 24, № 2. С. 117–125. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-11>

Citation

Struchkov N.F., Vinokurov G.G. Formation of the macrostructure and porosity of the wearproof modified powder coatings // Arctic and Subarctic natural resources. 2019, vol. 24, No. 2. pp. 117–125. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-11>