

УДК 621.793.72

ОТКРЫТАЯ ПОРИСТОСТЬ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2018 Д.И. Лебедев, Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Статья поступила в редакцию 28.06.2018

Исследована открытая пористость износостойких модифицированных покрытий в зависимости от состава порошковых материалов и технологических режимов нанесения. Методом гидростатического взвешивания определены значения открытой пористости газотермических покрытий с модифицирующими добавками, установлена взаимосвязь открытой пористости с шероховатостью поверхностей трения износостойких покрытий.

Ключевые слова: порошковое покрытие, модификация, макроструктура, пористость, поверхность трения, шероховатость, взаимосвязь.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время порошковые защитные покрытия широко используются в промышленности [1-3]. Одной из основных характеристик порошковых покрытий является их пористость с размерами пор в весьма широком диапазоне $\sim 10^{-8} - 10^{-4}$ м [1-5]. 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 положительно му эффекту по износостойкости - снижениям коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Широкий диапазон размеров пор обеспечивает большие возможности управления физико-механическими и триботехническими свойствами износостойких покрытий. Этим определяется несомненная актуальность исследования пористости газотермических покрытий с учетом их состава, содержания модifikаторов, технологических режимов нанесения и др.

Целью данной работы является установление взаимосвязи открытой пористости и шероховатости поверхности износостойких модифицированных порошковых покрытий.

Лебедев Дмитрий Иосифович, кандидат технических наук, научный сотрудник. E-mail: uranhai@rambler.ru
Винокуров Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, заведующий сектором, ведущий научный сотрудник. E-mail: g.g.vinokurov@iptpn.usn.ru
Стручков Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
E-mail: struchkov_n@rambler.ru

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования в работе являются износостойкие покрытия, полученные из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками корунда Al_2O_3 (разработка Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН) [6], проволок с добавками вольфрама W и tantalа Ta, а также оплавленные газопламенные покрытия с ультрадисперсными модифицирующими добавками шпинелей кобальта и меди.

Порошковая проволока, содержащая тугоплавкий оксид Al_2O_3 , состоит из стальной оболочки с шихтой 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. 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 промышленной установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 (разработки ООО «Веха-1», г. Комсомольск-на-Амуре) при следующих технологических режимах электродуговой металлизации (табл. 1).

В порошковых проволоках с модифицирующими добавками вольфрама W и tantalа Ta варьировалось содержание модификаторов в шихте - W (0,1%, 0,3% и 1%, масс.) и Ta (0,1%, 0,3% и 1%, масс.); основу порошкового материала представляет промышленный порошок ПГСР-4 системы Ni-Cr-B-Si; проволоки имеют диаметр 1,92мм. Покрытия с модифицирующими добавками вольфрама W и tantalа Ta нанесены также на установке «ЭДУ-500» при технологических режимах: ток дуги - 200-220А, напряжение 38-40В, дистанция напыления 150-180 мм; толщина покрытий составляет 0,8-1,2мм.

Таблица 1. Технологические режимы электродуговой металлизации покрытий с тугоплавкими добавками корунда

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

Напыление и оплавление покрытий с ультрадисперсными добавками шпинелей кобальта (0,2 % масс.) и меди (0,2 % масс.) проводилось газовой горелкой «Mogul-9» (расход C_2H_4 – 12 л/мин; расход O_2 – 18 л/мин; расход порошка – 8 кг/ч; дистанция напыления – 100 мм). Основу порошкового материала покрытия также представляет промышленный порошок ПГСР-4 системы Ni-Cr-B-Si.

Для проведения измерений были изготовлены цилиндрические и прямоугольные образцы с покрытием на торцевой стороне. Определение открытой пористости газотермических покрытий проводилось методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 9.304-87 [7].

При использовании данного метода, основным фактором, определяющим его точность, является степень насыщения открытых пор покрытия рабочей жидкостью. Применение керосина, обладающего высокой проникающей способностью, в качестве пропитывающей жидкости позволяет исключить дополнительные операции пропитки, необходимые при использовании других жидкостей [2,5,7,8]. Поэтому в работе в качестве рабочей пропитывающей жидкости открытых пор покрытия был использован керосин.

Взвешивание образцов на воздухе и в жидкой среде проведены на электронных весах с точностью до 0,0001 г.

Для изучения поверхностей трения проведены испытания на износ покрытий по стандартной методике на трибомашине CETR UMT-2 (США) при следующих режимах: схема трения «столбик-диск», нагрузка – 30 Н, частота – 10 оборотов в секунду, трение сухое, продолжительность испытаний – 1 час. Стандартные характеристики шероховатости покрытий были измерены профилометром Surftest SJ-201P (Mitutoyo, Япония). Определялись среднеарифметическое отклонение профиля – R_a , среднеквадратическое отклонение профиля R_q , наибольшая высота по неровностям R_z .

Таблица 2. Результаты измерения открытой пористости и характеристик шероховатости покрытий с тугоплавкими добавками корунда

№ режима	Π , %	R_a , мкм	R_q , мкм	R_z , мкм
3	3,02	0,76	1,15	6,16
6	1,64	0,41	0,5	2,49
9	1,97	0,92	1,21	5,96

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение открытой пористости газотермических покрытий проводилось методом гидростатического взвешивания. Открытая пористость определялась по следующей формуле:

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

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). В табл. 2 приведены результаты измерения открытой пористости покрытий с тугоплавкими добавками корунда, напыленных при разных технологических режимах (табл. 1).

Как показали исследования, уровень открытой пористости и шероховатости газотермического покрытия существенно зависит от изменений технологических режимов его получения, содержания модификаторов и последующей термической обработки. Наименьшее значение 1,64% открытой пористости и параметров шероховатости R_a , R_q и R_z наблюдается у покрытия с добавками корунда, полученного при технологическом режиме №6. При незначительном снижении напряжения дуги (до $U=30$ В) открытая пористость покрытия увеличивается практически вдвое, рост напряжения дуги до 40 В также повышает пористость до ≈2% (табл. 2). Также высокие значения параметров шероховатости наблюдаются у покрытий, полученных при режимах № 3 и №9.

Как известно, пористость является количественной характеристикой макроструктуры порошковых покрытий. Формирование макроструктуры покрытия из множества частиц порошкового материала, вследствие их разбрзгивания, неполного расплавления в плазме и неплотной упаков-

ки, приводит к образованию пористости. Поэтому наличие пор в газотермических покрытиях отражается на особенностях их макроструктуры.

На рис. 1 приведены характерные макроструктуры покрытий с тугоплавкими добавками Al_2O_3 , полученных при различных технологических режимах металлизации. 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. Из рис. 1 видно, что во всех покрытиях наблюдается наличие оксидных пленок и пор на границах деформированных частиц (сплэтов) и поры неправильной формы, образованные на границах нескольких частиц, вследствие их неплотной укладки. Высокая пористость покрытия, полученного по режиму №3 (табл. 1), определяется большими размерами таких пор сложной формы (рис. 1, а). Сопоставимость значений пористости покрытий, полученных по режимам №6 и №9, подтверждается относительной схожестью их макроструктуры (рис. 1, б, в). 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.

В табл. 3 приведены результаты измерения открытой пористости и шероховатости покрытий с модифицирующими добавками вольфрама W и тантала Ta. Как видно из таблицы, при увеличении содержания модифицирующих добавок

от 0,1% до 1% масс., пористость и параметры шероховатости обоих видов покрытий изменяется немонотонным образом. Для покрытий с вольфрамом уровень пористости составляет от $\approx 4,9\%$ до $\approx 8,7\%$, максимальное значение наибольшей высоты профиля $Rz=46,26$ при содержании W-0,3%. Пористость покрытий с tantalом - от $\approx 5,9\%$ до $\approx 7,8\%$, максимальное значение размаха профиля $Rz=34,38$ при содержании Ta - 0,1%.

На рис. 2 приведены изображения структуры покрытий с модифицирующими добавками вольфрама W и tantalа Ta. Видно, что газотермические покрытия обоих видов имеют неоднородную слоистую структуру, состоят из наложенных друг на друга расплавленных частиц порошковой проволоки с прослойками оксидных пленок между ними. Поры, как и в случае покрытия с модифицирующими добавками корунда (рис. 1), образуются на границах и стыках наложенных расплавленных и оплавленных частиц (рис. 2).

Обзор и анализ литературных данных показывает, что для дальнейшего повышения износостойкости газотермических покрытий широко используются способы их последующей термической обработки [1-3]. При этом улучшается структура покрытия, становится более однородной; также снижаются и исчезают термические напряжения, значительно уменьшается пористость крупных размеров.

В работе проведены измерения пористости газопламенных покрытий с ультрадисперсными добавками шпинелей CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 . Вследствие меньшей температуры горения га-

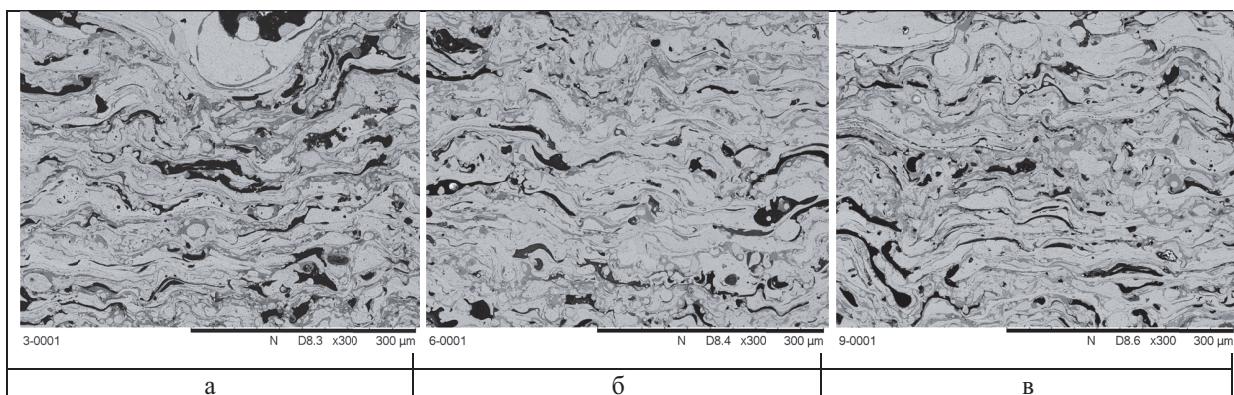


Рис. 1. Макроструктура покрытий с тугоплавкими добавками Al_2O_3 , полученных при различных технологических режимах (табл. 1): а – №3; б – №6; в – №9

Таблица 3. Результаты измерения открытой пористости и характеристик шероховатости покрытий с модифицирующими добавками вольфрама W и tantalа Ta

Модификатор	$\Pi, \%$	$Ra, \mu\text{м}$	$Rq, \mu\text{м}$	$Rz, \mu\text{м}$
W (0,1%)	4,87	4,62	5,85	25,77
W (0,3%)	8,67	8,39	10,56	46,26
W (1%)	7,48	3,53	4,46	21,21
Ta (0,1%)	7,85	3,69	7,23	34,38
Ta (0,3%)	5,94	3,26	4,24	20,48
Ta (1%)	6,73	5,76	7,25	31,95

зовой горелки по сравнению с температурой электрической дуги, структура газопламенных покрытий формируется с большим уровнем пористости. Поэтому целесообразным является последующее оплавление газопламенных покрытий с целью улучшения их структуры.

Покрытия с ультрадисперсными добавками шпинелей CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 были подвергнуты оплавлению дополнительной обработкой газовой горелкой и далее, в термической печи. Как показали исследования, после оплавления структура газопламенных покрытий становится однородной, межчастичные поры практически отсутствуют. Измерения методом гидростатического взвешивания не обнаружили открытой пористости оплавленных покрытий в пределе точности метода, которая составляет $\approx 0,4\%$ [4, 5, 7, 8].

На рис. 3 приведено изображение структуры оплавленного покрытия с модифицирующими добавками шпинели CoAl_2O_4 . Наблюдаются содержание неметаллических включений в покрытии, расположенных по границам частиц, формирующих покрытие при напылении, и сохраняющих свою форму при оплавлении. Эти включения

представляют собой конгломерат частиц ультрадисперсных добавок, пропитанный флюсом, образующимся при оплавлении. Наличия поровых пространств или прослоек практически не наблюдается или их содержание предельно минимально; отдельные внутренние поры не имеют сообщения с поверхностью (рис. 3). Таким образом, последующим оплавлением газотермических покрытий системы Ni-Cr-B-Si можно практически устранить их открытую пористость.

На рис. 4. приведены результаты зависимости характеристики профиля Rz поверхности модифицированных покрытий от их открытой пористости. Как видно из таблиц 2,3 и рисунка 4, параметры шероховатости износостойких покрытий зависят от уровня открытой пористости. Наименьшее значение открытой пористости (1,64%) и параметра шероховатости наблюдается у покрытия №6 с добавками корунда Al_2O_3 , наибольшее значение открытой пористости (8,67%) и параметра шероховатости Rz у покрытия с упрочняющими добавками вольфрама W (0,3%). В других покрытиях также наблюдается возрастающая взаимосвязь параметров шеро-

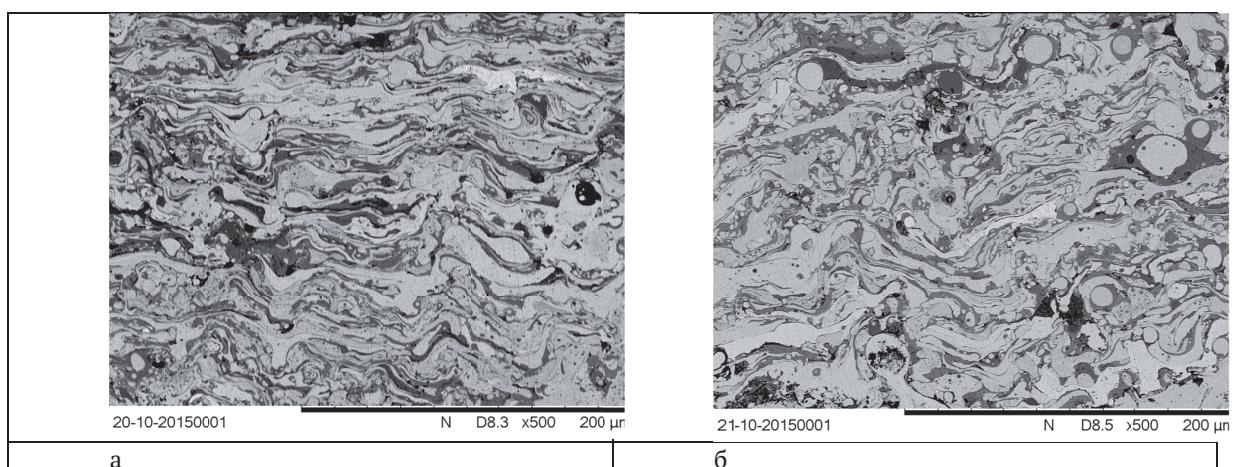


Рис. 2. Структура покрытий с модифицирующими добавками вольфрама W и тантала Ta:
а – W (1%); б – Ta (0,1%)

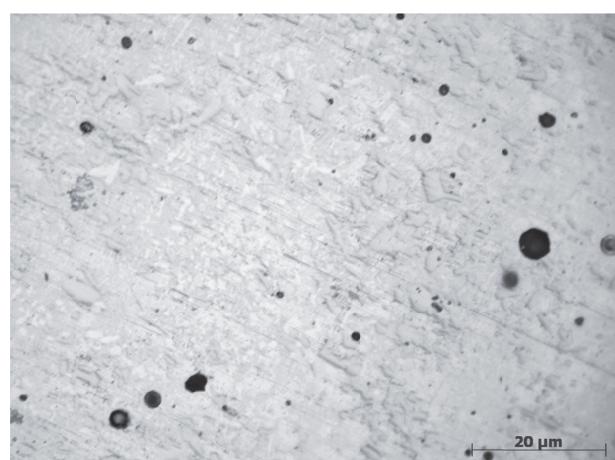


Рис. 3. Структура оплавленного газопламенного покрытия с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4

ховатости и пористости, что показывает положительную корреляционную связь открытой пористости и характеристики шероховатости Rz (коэффициент корреляции $\approx 0,92$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом гидростатического взвешивания установлены уровни открытой пористости газотермических покрытий с модифицирующими добавками корунда Al_2O_3 , покрытий с добавками вольфрама W и тантала Ta, оплавленных газопламенных покрытий с ультрадисперсными добавками шпинелей CoAl_2O_4 и CuAl_2O_4 . Показано, что уровень открытой пористости газотермического покрытия существенно зависит от изменений технологических режимов его полу-

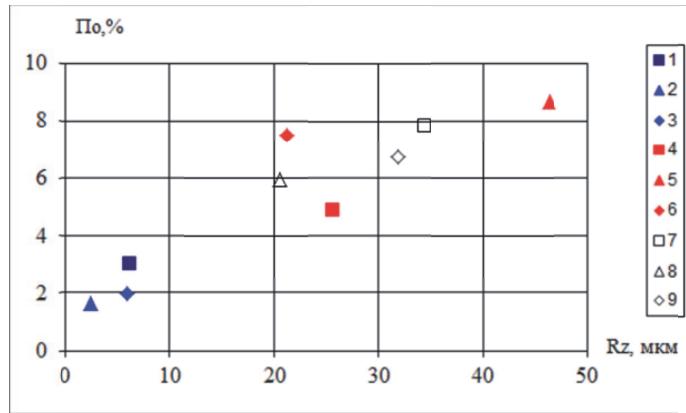


Рис. 4. Взаимосвязь открытой пористости и характеристики шероховатости Rz:
 1 – оксид Al₂O₃, режим №3; 2 – оксид Al₂O₃, режим №6; 3 – оксид Al₂O₃, режим №9; 4 – W (0,1%);
 5 – W (0,3%); 6 – W (1%); 7 – Ta (0,1%); 8 – Ta (0,3%); 9 – Ta (1%); коэффициент корреляции ≈0,92

чения, содержания модификаторов и последующей термической обработки.

2. Наименьшее значение 1,64% открытой пористости наблюдается у покрытия с добавками корунда, полученного при технологическом режиме №6 (ток I=280-300А, напряжение U=35В, дистанция напыления L=130мм). При незначительном снижении напряжения дуги (до U=30В) открытая пористость покрытия увеличивается практически вдвое, рост напряжения дуги до 40В также повышает пористость до ≈2%. Для покрытий с вольфрамом уровень открытой пористости составляет от ≈4,9% до ≈8,7%, пористость покрытий с tantalом - от ≈5,9% до ≈7,8%.

3. Показано, что последующим оплавлением газотермических покрытий системы Ni-Cr-B-Si можно практически устранить их открытую пористость. После оплавления структура газопламенных покрытий с ультрадисперсными добавками шпинелей CoAl₂O₄ и CuAl₂O₄ становится однородной, межчастичные поры практически отсутствуют, отдельные внутренние поры не имеют сообщения с поверхностью.

4. Установлено, что в порошковых износостойких покрытиях наблюдается взаимосвязь параметра шероховатости Rz поверхностей трения и уровня открытой пористости с положительной корреляционной связью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
- Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко, О.П. Солоненко, В.А. Сафиуллин. М.: Наука, 1990. 408с.
- Бороненков В.Н., Коробов Ю.С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. 268 с.
- Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. М.: Мир, 2004. 384 с.
- Определение пористости газотермических покрытий / Э.Х. Исакаев, В.Б. Мордвинский, Н.Б. Подымова, Е.В. Сидорова, Е.И. Школьников // Физика и химия обработки материалов. 2010. №5. С. 71-77.
- Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Шевченко В.Г., Виноградов А.В. Порошковая проволока для получения покрытий. Пат. 2048273 (РФ) 1995.
- ГОСТ 9.304-87 Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов. 1988. 10 с.
- Рогожкин В.М., Акимова Л.В., Смирнов Ю.В. Определение пористости напыленных покрытий методом гидростатического взвешивания // Порошковая металлургия. 1980. № 9(213). С. 42-46.

OPEN POROSITY AND ROUGHNESS OF THE SURFACE OF WEARPROOF POWDER COATINGS

© 2018 D.I. Lebedev, G.G. Vinokurov, N.F. Struchkov

Institute of Physics and Technology Problems of the North of V.P. Larionov
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science

The research of the open porosity of the wearproof modified coverings depending on composition of powder materials and the technological modes of drawing is. The method of hydrostatic weighing has determined levels of open porosity of gas-thermal coatings with the modifying additives, the interrelation of open porosity with roughness of surfaces of wearproof coatings is established.
Keywords: powder coating, modifying, counterbody, wear, roughness, correlation, porosity.

Dmitry Lebedev, Candidate of Technical Sciences, Research Fellow. E-mail: uranhai@rambler.ru
 Gennady Vinokurov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Sector, the Leading Research Fellow.

E-mail: g.g.vinokurov@iptpn.yandex.ru
 Nikolay Struchkov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow. E-mail: struchkov_n@rambler.ru