

УДК 674.236

А. А. ДЖАФАРОВА, Р. А. ИМАНОВА

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ОКСИДИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

В статье приводятся результаты исследований влияния пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их коэффициент трения, суммарный износ, влияние приработки и критический коэффициент интенсивности напряжений и триботехническими характеристиками оксидированного порошкового железа как чистого, так и легированного 1,5 % С и 2 % Cu при пористости 5–6 % в при поверхностном слое материалов возникает значительная концентрация напряжений, которая оказывает отрицательное влияние на триботехнические характеристики деталей.

**Ключевые слова:** пористость, коэффициент трения, оксидирование, суммарный износ, порошковое железа, примеси.

У статті наводяться результати досліджень впливу пористості оксидованих порошкових матеріалів на основі заліза на їх коефіцієнт тертя, сумарний знос, вплив підробітки і критичний коефіцієнт інтенсивності напружень і триботехнічними характеристиками оксидованого порошкового заліза як чистого, так і легованого 1,5 % С і 2 % Cu при пористості 5–6 % в при поверхневому шарі матеріалів виникає значна концентрація напружень, яка чинить негативний вплив на ріботехнічні характеристики деталей.

**Ключові слова:** пористість, коефіцієнт тертя, оксидування, сумарний знос, порошкове заліза, домішки.

The article presents the results of researches of influence of porosity of the oxidized powder materials based on iron in IHI coefficient of friction total wear, the impact of running and the critical stress intensity factor and tribological characteristics of oxidized powder of iron, both pure and alloyed 1.5% and 2% Cu porosity of 5–6 % in the surface layer of materials there is a considerable stress concentration, which has a negative effect on tribotechnika characteristics of the parts.

Thus, as a result of the lead researches installed, monoton dependence on porosity of tribotechnical properties of sintered and oxidized iron powder is as pure and doped with 1.5% from 2% and Cu. Discovered the relationship between critical stress intensity factor and tribotechnical properties of materials. When the minimum values for the total wear and time burnishing samples with  $p = 5-6\%$  match with a minimum. Between the porosity of the materials most prone to the appearance in their large subsurface stress concentrations and, apparently, submikrotreshhin, which has a substantial impact on their tribological characteristics.

**Keywords:** porosity, coefficient of friction, oxidation, total wear, powder of iron impurities.

**Введение.** Повышение стойкости к износу взаимно перемещающихся трущихся поверхностей деталей машин является достаточно сложной практической задачей. Эта сложность связана как с необходимостью регулирования химического состава и микроструктуры, определяющих физико-механические свойства сплава детали, так и с необходимостью обеспечения высокого качества и геометрии трущихся поверхностей, а также их микроструктуры и минимизации наличия поверхностных дефектов. И если первая составляющая управляется путем оптимизации химического состава сплава, формирующего микроструктуру и свойства, исследованием соответствующих регрессионных уравнений [1, 2], то для второй составляющей необходим учет дополнительных особенностей. К ним, в первую очередь, следует отнести необходимость исследования закономерностей изменения напряженного состояния поверхностных слоев трущихся тел, содержащих твердые включения типа оксидов. Именно эта составляющая и вызывает определенный научно-практический интерес.

Исследование закономерностей изменения напряженного состояния поверхностных слоев трущихся тел, содержащих твердые включения типа оксидов, вызывает определенный научно-практический интерес. Установленная в [3, 4] немонотонная зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$  порошкового материала от пористости показывает целесообразность уточнения этих закономерностей для порошковых материалов.

В данной статье изложены результаты экспериментального исследования влияния пористости в пределах от 4 до 18 % на триботехнические свойства порошковых материалов на основе железа, подвергнутых оксидированию и сделана попытка интерпрети-

ровать их с учетом характера изменения пористых материалов и факторов, влияющих на него.

**Материалы и методики экспериментов.** Объектами изучения были образцы, изготовленные многократным прессованием с промежуточными отжигами из железного порошка как чистого, так и легированного медью и графитом. Исходный железный порошок предварительно просеивали через сито с ячейками 160 мкм для удаления крупных частиц.

Пористость образцов в диапазоне от 4 до 18 % изменялась через 1,5–2,5 %. Термическая обработка образцов независимо от конечной пористости была одинаковой. Материалы, изготовленные из чистого железного порошка, выдерживали в течение 1, а легированного медью и углеродом – 1,5 часа при температуре 1150 и 1100°C соответственно. Паротермическую обработку обоих типов образцов проводили при одинаковых режимах, изложенных в главе 2. После спекания и парообработки оценивали триботехнические характеристики образцов, их  $K_{IC}$ , пористость, микроструктуру. Испытания на трение проводили в режиме ограниченной подачи масла ХМ-6 при скорости скольжения 2 м/с и давлениях 2,35 и 4,70 МПа для образцов, изготовленных соответственно из чистого железного и легированного медью и углеродом, (длительность испытания 12 ч, путь трения 100 км) [5, 6].

Образцы для определения триботехнических свойств размером 5x10x15мм изготавливали из образцов, испытанных на  $K_{IC}$ . Контртелом служила закаленная сталь 45 твердостью 38–42 HRC и шероховатостью поверхности  $R_a=0,5$  мкм.

**Обсуждение результатов.** О триботехнических свойствах судили по коэффициенту трения, суммарному линейному износу и времени приработки. Их

© А. А. Джафарова, Р. А. Иманова. 2016

зависимость от количества пор в материалах показана на рис. 1. Для  $P=5-6\%$  на кривых суммарного износа и времени приработки наблюдается минимум, при этом коэффициент трения возрастает на 25 %, а суммарный износ и врем приработки уменьшается примерно вдвое. При дальнейшем увеличении пористости (6 %) рассматриваемые свойства достигают уровня значений, характерных для этих материалов.

Так как структуры образцов различались практически лишь количеством пор, то для объяснения обнаруженных закономерностей была сделана попытка сопоставить их со значениями  $K_{IC}$ , которые определяли при температуре жидкого азота на образцах прямоугольного сечения. Результаты испытаний (рис. 1, г.) практически не отличаются от полученных при комнатной температуре. При этом характер изменения  $K_{IC}$  исследованных материалов одинаков, а его аномально низкие значения соответствуют  $P=5-6\%$ . Совпадение при  $P=5-6\%$  минимальных величин  $K_{IC}$  суммарного износа и времени приработки позволяет сделать вывод, что материалы образцов изготовленных из чистого железного порошка и легированного 1,5 % С и 2,0 % Си (по массе) и подвергнутые оксидированию, наиболее склонны к повышенной концентрации напряжений в рабочем слое под воздействием внешних нагрузок [7, 8]. Это существенно влияет на их разрушение при изнашивании.

Поверхность трения материалов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа. Электронно-микроскопические снимки для порошкового железа представлены на рис. 2. Вид поверхностей трения исследованных образцов при различных пористостях (исключая  $P=5-6\%$ ) практически одинаков. Поверхность трения образца при  $P=5-6\%$ , наиболее легко прирабатываемого, не имеет следов изнашивания, обусловленных процессами микрорезания, т.е. ощущается «вклад» оксидов железа, сконцентрированных на поверхности трения материала. Анализ полученных данных позволяет предположить,

что материал в интервале пористостей, соответствующих наиболее низким значениям  $K_{IC}$  в при поверхностном слое может проявлять склонность к субмикротрещиноватости, обусловленной взаимодействием пор под воздействием внешних нагрузок. Субмикротрещиноватость, способствуя релаксации напряжений, возникающих как результат трения и изнашивания, и стоку на поверхность субмикротрещин дефектов кристаллической решетки при ее упругопластической деформации, облегчает прирабатываемость и уменьшает суммарный износ.

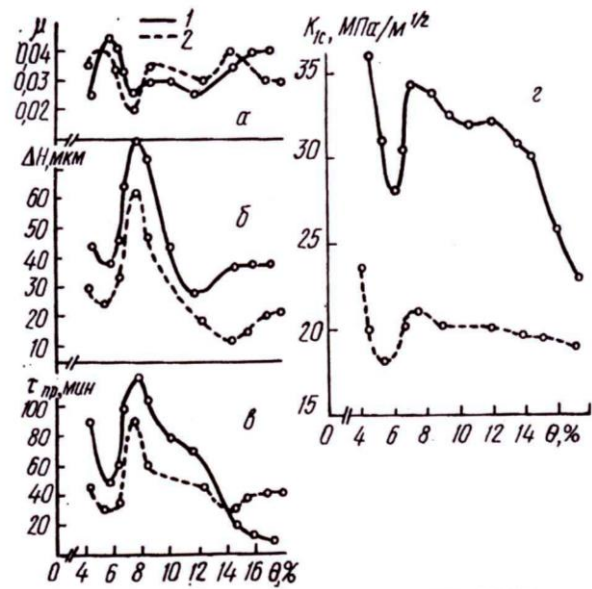


Рис. 1 – Изменение в зависимости от пористости: а – коэффициента трения, б – суммарного износа, в – времени приработки, г – критического коэффициента интенсивности напряжений при  $196^{\circ}\text{C}$ ; 1 – чистого оксидированного порошкового железа, 2 – легированного 1,5 % С и 2,0 % Си.

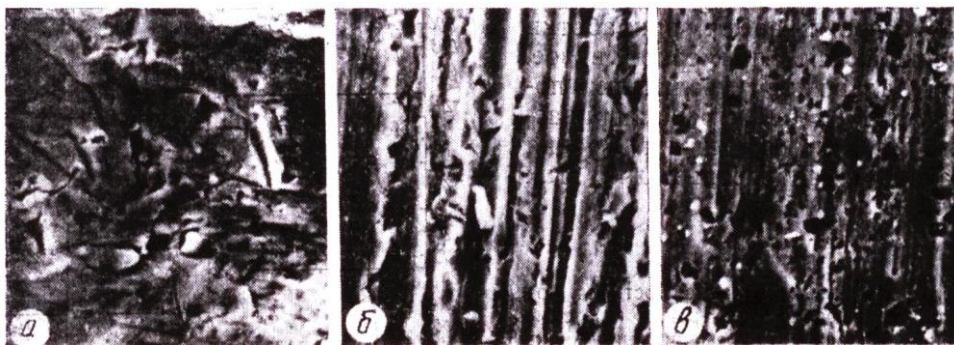


Рис. 2 – Электронно-микроскопические снимки поверхностей трения оксидированных порошковых материалов:  $P=5,6$  (а); 8,0(б); 13,5(в)  $\times 2000$

Различие в состоянии рабочих поверхностей трения изученных порошковых материалов можно объяснить, исходя из перераспределения в них примесей с изменением пористости [9, 10]. Концентрация примесей по границам зерен при определенных значениях  $P$  вызывает хрупкое межзеренное разрушение порошковых оксидированных материалов, снижает уровень  $K_{IC}$  и, следовательно, некоторых триботехнических свойств (рис. 1, б, в).

Следует обратить внимание на характер изменения триботехнических свойств материалов при  $P>8\%$ . Можно ожидать, что они должны монотонно изменяться по мере увеличения пористости, так как взаимодействие пор на них существенно не влияет. Однако результаты эксперимента свидетельствуют о более сложном поведении материалов пористостью более 12 %. Так, при  $P 12\%$  начинает увеличиваться суммарный износ образцов, изготовленных из чистого

железного порошка, а для легированного порошка на кривых изменения триботехнических свойств с пористостью наблюдается тенденция к минимальным значениям суммарного износа и времени приработки материала. Можно предположить, что увеличение суммарного износа оксидированного порошкового железа обусловлено низким уровнем его механическим свойств, а установленное изменение суммарного износа и времени приработки оксидированного железа, легированного медью и углеродом - возможным приповерхностным зарождением трещин под воздействием локального увеличения напряжений вблизи оксидной фазы (2, 3). Наблюдаемые закономерности нуждаются в более детальном изучении и выяснении истинной природы изменения триботехнических свойств порошковых материалов.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена, немонотонна зависимость от пористости триботехнических свойств спеченного и оксидированного порошкового железа – как чистого, так и легированного 1,5 % С и 2 % Си. Обнаружена связь между критическим коэффициентом интенсивности напряжений и триботехническими свойствами материалов. При этом минимальные величины суммарного износа и времени приработки образцов при  $P=5-6\%$  совпадает с минимумом  $K_{IC}$ . В указанном интервале пористости материалы наиболее склонны к появлению (под воздействием внешних нагрузок) в их приповерхностном слое значительной концентрации напряжений и, по-видимому, субмикротрещиноватости, что оказывает существенное влияние на их триботехнические характеристики [11, 12].

Учитывая данные этих результатов, нами были проведены дополнительные исследования триботехнических характеристик железнографитовых порошковых материалов, подвергнутых пароксидированию.

**Выводы.** Изучение влияния пористости на триботехнические свойства оксидированных порошковых материалов на основе железа показало немонотонную зависимость между этими характеристиками. Установлена связь между критическим коэффициентом интенсивности напряжений и триботехническими свойствами оксидированного железа как чистого, так и легированного 1,5 % С и 2 % Си. При этом минимальные величины суммарного износа и времени приработки образцов при пористости 5–6 % совпадает с минимумом  $K_{IC}$ .

Как ни парадоксально при минимальной пористости, т.е. при  $P=5-6\%$  материалы наиболее склонны к появлению (под воздействием внешних нагрузок) в их приповерхностном слое значительной концентрации напряжений, результатом которых является, по-видимому, субмикро-трещиноватость, что и оказывает существенное отрицательное влияние на триботехнические характеристики деталей. Вблизи оксидной фазы зарождаются субмикротрещины в поверхностном слое, в котором они наиболее сконцентрированы.

#### Список литературы:

1. Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – № 10. – P. 18–19.

2. Demin, D. A. Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1995. – № 7-8. – P. 42–43.
3. Федорченко, И. М. Влияние содержания и размеров частиц графита на структуру и триботехнические характеристики меднографитовых материалов [Текст] / И. М. Федорченко // Порошковая металлургия. – 1986. – № 9. – С. 84–90.
4. Федорченко, И. М. Основы порошковой металлургии [Текст] / И. М. Федорченко, Р. Д. Андриевский. Киев: АН УССР, 1963. – 420 с.
5. Федорченко, И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы [Текст] / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. Киев: Наукова думка, 1980. – 244 с.
6. Бальшин, М. Ю. Общие научные принципы порошковой металлургии и их применение [Текст] / М. Ю. Бальшин. Киев: Наукова думка, 1980. – 346 с.
7. Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов [Текст] / Ю. Г. Дорофеев. Москва: Металлургия, 2009. – 176 с.
8. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. Москва: Машиностроение, 2006. – 375 с.
9. Бебнев, П. И. Трение и износ пористого железнографита [Текст] / П. И. Бебнев. Москва: Машиностроение, 2014. – 124 с.
10. Мамедов, А. Т. Порошковые материалы конструкционного назначения [Текст] / А. Т. Мамедов. Баку: Элм, 1990. – 188 с.
11. Мошков, А. Д. Пористые антифрикционные материалы [Текст] / А. Д. Мошков. Москва: Машиностроение, 1998. – 208 с.
12. Джонс, В. Д. Основы порошковой металлургии [Текст] / В. Д. Джонс. Москва: Мир, 1995. – 270 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Demin, D. A., Pelikh, V. F., Ponomarenko, O. I. (1998). Complex alloying of grey cast iron. Litejnoe Proizvodstvo, 10, 18–19.
2. Demin, D. A., Pelikh, V. F., Ponomarenko, O. I. (1995). Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron. Litejnoe Proizvodstvo, 7-8, 42–43.
3. Fedorchenko, I. M. (1986). Vlijanie soderzhaniya i razmerov chastic grafitu na strukturu i tribotekhnicheskie harakteristiki mednografitovykh materialov. Poroshkovaja metallurgija, 9, 84–90.
4. Fedorchenko, I. M., Andrievskij, R. D. (1963). Osnovy poroshkovej metallurgii. Kiev: AN USSR, 420.
5. Fedorchenko, I. M., Pugina, L. I. (1980). Kompozicionnye spechennye antifrikcionnye materialy. Kiev: Naukova dumka, 244.
6. Bal'shhin, M. Ju. (1980). Obshhie nauchnye principy poroshkovej metallurgii i ih primenenie. Kiev: Naukova dumka, 346.
7. Dorofeev, Ju. G. (2009). Dinamicheskoe gorjachee pressovanie poristykh materialov. Moscow: Metallurgija, 176.
8. Kragel'skij, I. V. (2006). Trenie i iznos. Moscow: Mashinostroenie, 375.
9. Bebnev, P. I. (2014). Trenie i iznos poristogo zhelezografita. Moscow: Mashinostroenie, 124.
10. Mamedov, A. T. (1990). Poroshkovye materialy konstrukcionnogo naznachenija. Baku: Elm, 188.
11. Moshkov, A. D. (1998). Poristye antifrikcionnye materialy. Moscow: Mashinostroenie, 208.
12. Dzhons, V. D. (1995). Osnovy poroshkovej metallurgii. Moscow: Mir, 270.

Поступила (received) 15.01.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Влияние пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их триботехнические характеристики/ А. А. Джафарова, Р. А. Иманова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.7–10. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Вплив пористості оксидованих порошкових матеріалів на основі заліза на їх триботехнічні характеристики/ А. А. Джафарова, Р. А. Иманова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.7–10. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Influence of the porosity of the oxidized powder materials HB iron based on their tribological properties/ A. A. Jafarova, R. A. Imanova //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 7–10. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Джафарова Афат Ариф з.** – асистент, кафедра екології, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, г. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Иманова Рада Алиага з.** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, г. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Джафарова Афат Ариф з.** – асистент, кафедра екології, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, м. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Иманова Рада Алиага з.** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, м. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Jafarova Afat Arif** – assistant, Department of Ecology, Azerbaijan Technical University, etc. H. Javid, 25, Baku, Azerbaijan, Az1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Imanova Rada Aliaga** – PhD., Associate Professor, Department of Materials Science, Azerbaijan Technical University, etc. H. Javid, 25, Baku, Azerbaijan, Az1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

УДК 621.763:539.4.015

**Е. В. ЗОЗУЛЯ, О. С. ТЕРЛЕЦЬКИЙ, А. Г. МЕНЬШИКОВ, В. В. СУББОТИНА, Т. О. ПРОТАСЕНКО**

### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

Композити на основі міді, зміцнені частками оксиду алюмінію, отримували електронно-променевим випаром компонентів з роздільних джерел з наступним їх спільним осадженням. Температури осадження змінювалися від 293 до 673 К. Методами рентгендіфрактометрії та просвічуючої електронної мікроскопії досліджено структуру композитів. Встановлено зміну морфології часток оксиду алюмінію при підвищенні температури підкладки. Розглянуто вплив змісту і розміру часток  $Al_2O_3$  на електричний опір, міцність і структурну стабільність при підвищених температурах. Запропоновано заходи поліпшення їх властивостей.

**Ключові слова:**  $Al_2O_3$ , мідь, композит, електронно-променеве випаровування, структурна стабільність, міцність, електричний опір.

Композиты на основе меди, упрочнённые частицами оксида алюминия, получали электронно-лучевым испарением компонентов из отдельных источников с последующим их совместным осаждением. Температуры осаждения изменялись от 293 до 673 К. Методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии исследована структура композитов. Установлена смена морфологии частиц оксида алюминия при повышении температуры подложки. Рассмотрено влияние содержания и размера частиц  $Al_2O_3$  на электрическое сопротивление, прочность и структурную стабильность при повышенных температурах. Предложены меры улучшения их свойств.

**Ключевые слова:**  $Al_2O_3$ , медь, композит, электронно-лучевое испарение, структурная стабильность, прочность, электрическое сопротивление.

Composites obtained by electron beam evaporation components from separate sources and their subsequent co-deposition. The deposition temperatures were changed from 293 K to 673. Methods of X-ray diffraction and transmission electron microscopy were used to study the microstructure of composites strengthened by aluminum oxide particles. Composites at  $Al_2O_3$  particle contents up to 3 vol. % were studied. Morphological change of aluminum oxide particles with increasing temperature of substrate and also at annealing was established. The particle size is closely related to phase transition. The effect of the size of particles of the oxide ( $Al_2O_3$ ) and of their content on the properties of the composite has been considered, in order to optimize these characteristics. The results of this work can be used for the creation of new-generation conductors with an optimum combination of strength and electrical conductivity.

**Keywords:**  $Al_2O_3$ , copper, composite, EB-PVD, structural stability, strength, electrical resistance.

**Введение.** Значительная практическая важность дисперсноупрочнённых композитов на основе системы «медь–оксид алюминия» служит стимулом для многочисленных экспериментальных исследований структурообразования, диспергирования и распределения упрочняющей фазы в объеме матрицы и механизмов упрочнения; создания и усовершенствования технологических процессов их изготовления, например [1–6]. Среди прогрессивных процессов, применяемых для производства таких материалов, в виде

фольг и покрытий, особое место занимает метод осаждения из пара в вакууме. В нем отсутствует ряд ограничений, свойственных другим методам, например, по содержанию упрочняющей фазы и материалу матрицы. Достигнут значительный прогресс в диспергировании частиц упрочняющей фазы – современной тенденции развития проводниковых дисперсноупрочнённых композитов.

© Е. В. Зозуля, О. С. Терлецький, А. Г. Меньшиков, В. В. Субботіна, Т. О. Протасенко. 2016