

УДК 621.923

**ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ****Г.В. ПЕТРИШИН***(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)*

*Приведена характеристика процесса изнашивания магнитно-электрических покрытий из самофлюсующихся порошков в сравнении с традиционно применяемыми в данной технологии материалами. Показано влияние наплавочного материала и условий эксплуатации деталей с покрытиями на их износостойкость.*

**Введение.** Магнитно-электрические методы обработки ввиду своих достоинств получили распространение в сельскохозяйственном машиностроении при нанесении покрытий на детали, работающие в условиях абразивного загрязнения, удара, коррозионного изнашивания. Сдерживающим фактором широкого развития и применения данной технологии является нестабильность процесса, высокая шероховатость поверхности, а также ограниченная толщина нанесенного слоя, соизмеримая с припуском на шлифование, ввиду чего невозможно их дополнительная механическая обработка по повышению качества поверхности. При этом ряд исследований магнитно-электрических методов обработки показал возможность управлять свойствами наносимых покрытий, совершенствованием как технологии, так и разработкой новых наплавочных материалов, учитывающих технологические особенности процесса. В практике наплавки другими методами широкое распространение получили самофлюсующиеся порошки на железной и никелевой основах [1], которые в технологии магнитно-электрического упрочнения до сих пор не применялись. В данной работе приведены результаты исследований износостойкости покрытий из борированных самофлюсующихся материалов, нанесенных магнитно-электрическим методом, проведенных по двум методикам – при сухом трении скольжения и абразивном изнашивании, характерных для элементов технологического оборудования и сельскохозяйственных машин.

**Цель данной работы** – исследование влияния состава наплавочного материала на износостойкость покрытий, нанесенных магнитно-электрическим методом, при различных условиях изнашивания.

**Методика исследований.** Износостойкие покрытия наносились на лабораторной установке на плоские образцы из стали 45 ГОСТ 1050, 40Х ГОСТ 4543, широко применяемых в сельскохозяйственном машиностроении, с размерами 10×40×20 мм. Для нанесения покрытий использовались как известные, так и разработанные материалы: ферробор марки ФБ-17; самофлюсующийся сплав на основе железа ПР-Х4Г2С2ФЮД (производство Российской Федерации); разработанный объемно-легированный самофлюсующийся порошок на основе серого чугуна [2]; диффузионно-легированные (ДЛ) порошки на основе отходов производства стальной дроби [3, 4]. После нанесения покрытий образцы дополнительной термообработке не подвергались. Исследования износостойкости проводили по двум методикам. Сравнительные испытания на износостойкость при трении скольжения исследовали на машине трения МСЦ-2 по методу Шкода – Савина [1]. Приняли следующие условия испытаний: нагрузка  $P = 147$  Н (15 кгс) (удельная нагрузка 5 МПа); частота вращения  $n = 730$  мин<sup>-1</sup> (скорость скольжения  $V = 126$  м/мин); диаметр диска 55 мм; ширина диска 10 мм; материал контртела Ст 3. Образец с покрытием был закреплен неподвижно. Рабочая поверхность диска имела шероховатость (Ra) 6,3 мкм; шероховатость покрытия составляла 10...12,5 мкм. Эталоном служил образец из Сталь 45 ГОСТ 4543-71 твердостью HRCэ 45...50. Для определения износостойкости покрытий в условиях абразивного изнашивания были проведены сравнительные испытания на машине трения типа Х4-Б специальной конструкции [1, 3]. Испытания проводили при трении о закрепленный абразив в соответствии с ГОСТ 17367-71. В качестве абразива использовалась шлифовальная шкурка П2Г 43А 2СНМ ГОСТ 6456-82.

Интенсивность изнашивания ( $I_M$ ) оценивали на единицу длины пути трения:

$$I_M = \Delta m / L \text{ (мг/м)}. \quad (1)$$

Среднее значение  $I_{M\text{CP}}$  получали по результатам пяти опытов.

Износостойкость ( $\varepsilon$ ) определяли величиной, обратной интенсивности изнашивания:

$$\varepsilon = 1 / I_M \text{ (м/мг)}. \quad (2)$$

Относительная износостойкость ( $\varepsilon_{\text{ОТН}}$ ) определялась отношением износостойкости покрытия ( $\varepsilon$ ) к износостойкости материала эталона ( $\varepsilon_{\text{ЭТ}}$ ):

$$\varepsilon_{\text{ОТН}} = \varepsilon / \varepsilon_{\text{ЭТ}}. \quad (3)$$

**Результаты исследований.** Испытания показали, что кривая изнашивания упрочненной поверхности имеет классический вид, содержащий участок приработки фрикционной пары, участок равномерного изнашивания и участок катастрофического износа, наблюдаемого при износе верхнего упрочненного слоя (рис. 1).

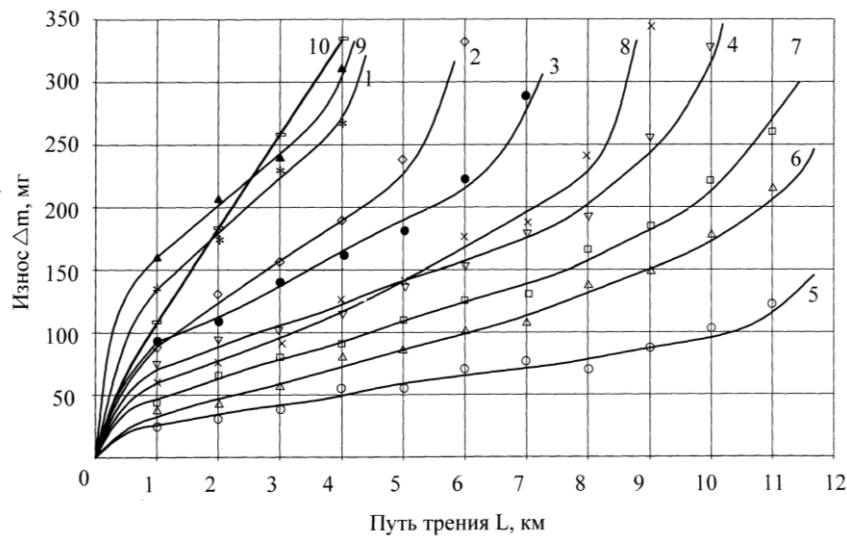


Рис. 1. Величина износа образцов при сухом трении скольжения покрытий из различных наплавочных материалов: 1 – порошок с содержанием бора 2,5 масс. %; 2 – порошок с содержанием бора 4,2 масс. %; 3 – порошок с содержанием бора 5,5 масс. %; 4 – порошок с содержанием бора 6,5 масс. %; 5 – порошок с содержанием бора 7,0 масс. %; 6 – порошок с содержанием бора 8,5 масс. %; 7 – порошок ПР-Х4Г2С2ФЮД; 8 – легированный чугун; 9 – ферробор ФБ-17; 10 – эталон (сталь 45); 1 – 6 – порошки по [4]; 8 – порошок по [2]

На графиках, характеризующих массовый износ упрочненной поверхности, видно, что все рассматриваемые в данной работе наплавочные материалы обеспечивают снижение износа по сравнению с эталоном. Лишь покрытия, нанесенные с использованием порошка ферробора ФБ-17, показали износостойкость, соизмеримую с износостойкостью закаленной стали-эталона.

Период приработки фрикционной пары у всех покрытий оказался примерно одинаковым и составил 500...600 м (примерно 5 минут испытаний). Достаточно высокий износ металла покрытия в период приработки даже у твердых покрытий объясняется изнашиванием микронеровностей поверхности. Так, магнитно-электрический метод характеризуется высокой шероховатостью покрытий ( $Ra$  10...12,5 мкм). Наибольший интерес с точки зрения оценки работоспособности покрытий представляет участок равномерного изнашивания. Исследования износостойкости упрочненных образцов на этом участке показали, что наивысшую износостойкость нанесенных покрытий среди разработанных ДЛ порошков обеспечивает порошок, содержащий  $6,9 \pm 0,10$  масс. % бора (рис. 2).

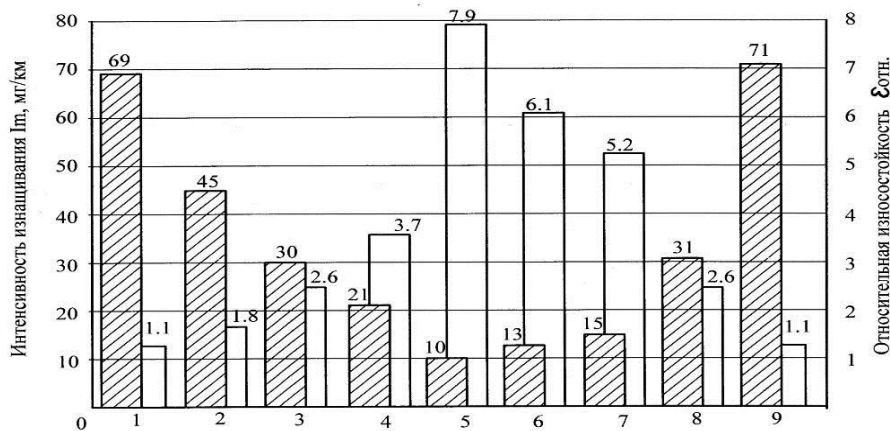


Рис. 2. Интенсивность изнашивания и относительная износостойкость покрытий при сухом трении скольжения: 1 – порошок с содержанием бора 2,5 масс. %; 2 – порошок с содержанием бора 4,2 масс. %; 3 – порошок с содержанием бора 5,5 масс. %; 4 – порошок с содержанием бора 6,5 масс. %; 5 – порошок с содержанием бора 7,0 масс. %; 6 – порошок с содержанием бора 8,5 масс. %; 7 – порошок ПР-Х4Г2С2ФЮД; 8 – легированный чугун; 9 – ферробор ФБ-17; 10 – эталон (сталь 45); 1 – 6 – порошки по [4]; 8 – порошок по [2]; штриховка 45° – интенсивность изнашивания; без штриховки – относительная износостойкость

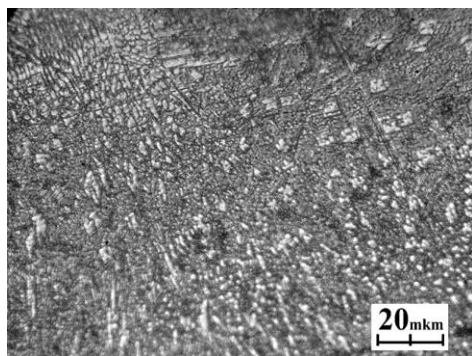


Рис. 3. Микроструктура покрытия, нанесенного магнитно-электрическим методом из диффузионно-легированного порошка с содержанием бора  $6,9 \pm 0,1$  масс. %,  $\times 500$

Скорость изнашивания покрытий, полученных методом МЭУ с использованием данного порошка, составляет 10 мг/км, в то время как скорость изнашивания эталона – 79 мг/км. Скорость изнашивания покрытий из менее легированных порошков изменяется в пределах 15...63 мг/км. Высокую износостойкость покрытий, полученных с использованием этих порошков, обеспечивают избыточные бориды  $Fe_2B$ , содержащиеся в металлической матрице (рис. 3). Кроме того, избыточные бориды и их оксиды, образующиеся в процессе изнашивания, имеют минимальную склонность к схватыванию с конструкционными материалами [1]. Порошки с меньшим содержанием бора не обеспечивают образование достаточного количества избыточных боридов, вследствие этого покрытия, полученные с применением таких порошков, показывают меньшую износостойкость. Отсюда можно предположить, что увеличение содержания в материале бора неизбежно приведет к повышению твердости и износостойкости.

Однако испытания показали, что увеличение в наплавочном материале количества бора свыше 8 % приводит к снижению износостойкости покрытий при сухом трении скольжения.

На рисунке 4 видно, что влияние содержания в материале бора носит экстремальный характер. При содержании бора до 7...8 % износостойкость покрытий возрастает, дальнейшее же увеличение содержания бора приводит к снижению износостойкости. Это обусловлено охрупчиванием избыточных боридов, вследствие чего при изнашивании они выкрашиваются, шаржируют поверхность и служат дополнительным абразивом. Здесь следует отметить то, что при нанесении покрытий плазменным методом точкой экстремума является содержание бора 6...7 % [1]. Это указывает на большее выгорание бора при нанесении покрытий методом МЭУ, а также на влияние метастабильности структуры нанесенных покрытий.

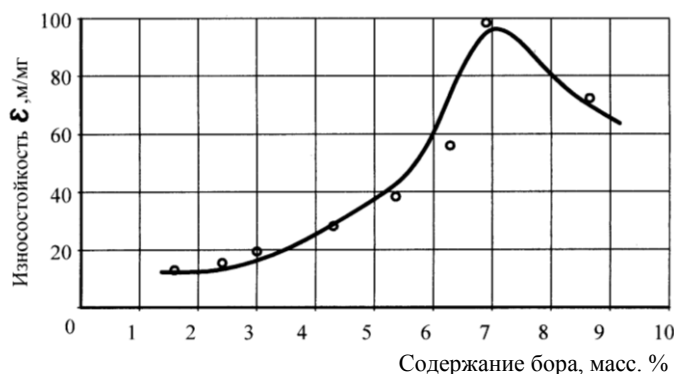


Рис. 4. Влияние содержания бора в ДЛ порошке [4] на износостойкость покрытий

Довольно высокую износостойкость покрытий показал объемно-легированный материал – легированный чугун. В этом случае повышенная износостойкость покрытий обеспечивается наличием в наплавочном материале бора (около 5 %), а также карбидообразующих легирующих элементов. Однако отсутствие в структуре белого слоя кристаллов боридов железа  $FeB$  не обеспечивает получения высокой твердости поверхности, что соответственно снижает его износостойкость.

Магнитно-электрические покрытия, полученные с применением ДЛ порошка с содержанием бора 6,5...7,5 масс. %, превосходят по износостойкости также покрытия,

полученные с использованием серийно выпускаемого самофлюсующегося порошка на железной основе ПР-Х4Г2С2ФЮД (скорость изнашивания покрытий в этом случае составляет 15 мг/км).

Очевидно, что здесь прослеживается тенденция, отмеченная ранее в работе [1] – покрытия из менее легированных порошков с более мягкой матрицей более износостойки при трении скольжения, чем высоколегированные самофлюсующиеся порошки. Объясняется это тем, что высоколегированные бориды таких покрытий обладают повышенной хрупкостью и склонностью к выкрашиванию, что является причиной ускоренного износа [1].

Важно отметить влияние наплавочного материала на рельеф изношенной поверхности. Формирование рельефа металлической поверхности при трении без смазочного материала более сложное, чем при абразивном изнашивании, так как процесс этот многофакторный. На формирование рельефа в равной мере влияют: параметры силового воздействия, структурная устойчивость, склонность к самоупрочнению, разупрочнению и задиристость материала, скорость скольжения, масштабный фактор, непрерывность или прерывистость трения [5]. Взаимодействие двух металлических поверхностей при трении под нагрузкой сопровождается постепенным изменением их начальной микро- и макрогеометрии, начинается взаимное проникновение микроучастков одной поверхности в другую, формируется множество выступов, оказывающих такое же воздействие, как твердые частицы при абразивном изнашивании.

Глубина рисок на изношенной поверхности определяется твердостью белого слоя и становится максимальной для покрытий, нанесенных магнитно-электрическим методом с использованием ферробора ФБ-17 и ДЛ порошков с содержанием бора менее 3 масс. %, имеющих наименьшую микротвердость. С повышением содержания в материале бора, а следовательно с повышением твердости покрытий, наблюдается снижение влияния микрогеометрии поверхности контртела на шероховатость поверхности. Для покрытий из порошков с содержанием бора 5,5...7,5 масс. %, а также порошка ПР-Х4Г2С2ФЮД микрогеометрия изношенной поверхности наряду с незначительной направленной шероховатостью имеет также следы выкрашивания, хаотично расположенные по всей поверхности изнашивания упрочненного образца (рис. 5).

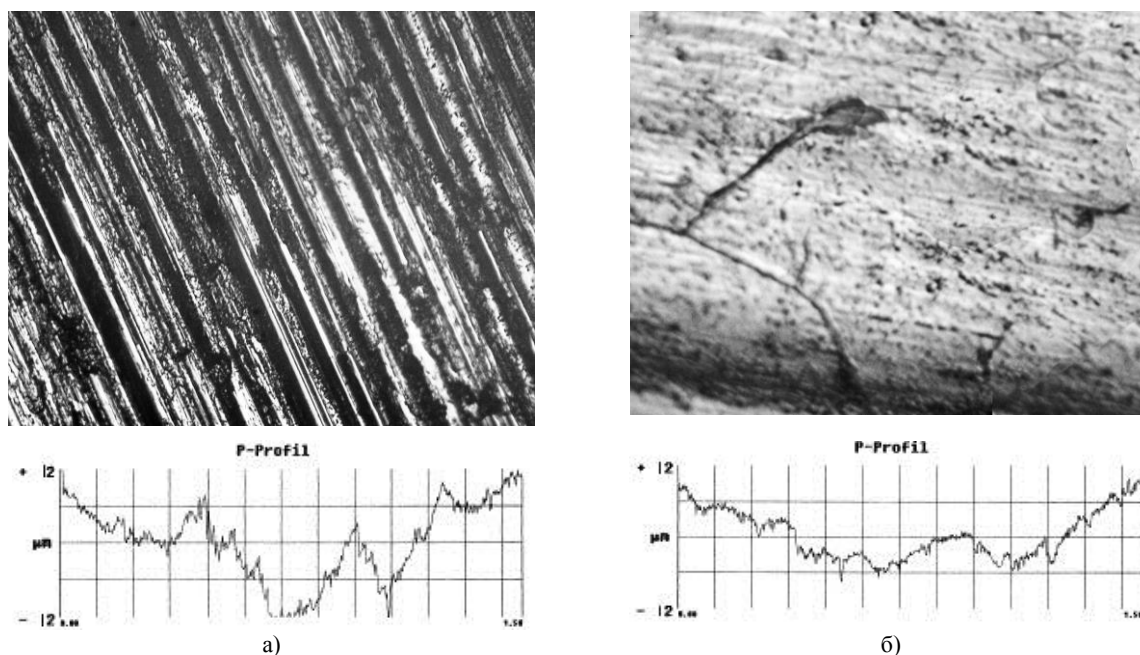


Рис. 5. Рельеф изношенной поверхности образца,  $\times 100$   
 а – покрытие из порошка с содержанием бора 3,0 масс. %;  
 б – покрытие из порошка с содержанием бора 7,0 масс. %

Здесь следует отметить, что явление выкрашивания при сухом трении скольжения вовсе не означает, что упрочненная поверхность имеет структуру с высокой твердостью и большим количеством карбидных и боридных фаз, характерное для абразивного изнашивания. При трении скольжения контакт взаимодействия гораздо более длительный, что обуславливает упрочнение поверхностного слоя наклепом с последующим трещинообразованием и выкрашиванием [6]. Выкрашивание при этом обусловлено возникновением очагов схватывания между поверхностями фрикционной пары ввиду высокой температуры в зоне трения при длительных испытаниях образцов. Именно поэтому явление выкрашивания и характерная микрогеометрия поверхности наблюдаются на образцах, подвергнутых наиболее длительным испытаниям ввиду их высокой износостойкости. Повышение количества бора и других легирующих элементов в применяемом порошке приводит к увеличению количества, глубины и размеров участков с выкрашиванием поверхности. Очевидно, повышенное содержание в материале бора (свыше 7...8 %) приводит к охрупчиванию боридов в покрытии и их хрупкому выкрашиванию при испытаниях (см. рис. 5). Это и объясняет снижение износостойкости покрытий, полученных с использованием таких порошков.

Дополнительным негативным фактором, влияющим на износостойкость магнитно-электрических покрытий, полученных с использованием самофлюсующихся порошков, является наличие таких легирующих элементов, как хром, молибден и вольфрам, присутствующих в материале порошка ПР-Х4Г2С2ФЮД. Эти элементы повышают микрохрупкость избыточных боридов, присутствующих в покрытиях [1], что приводит к появлению глубоких вырывов на изнашиваемой поверхности и снижению износостойкости покрытий. Однако эти легирующие элементы предотвращают окисление покрытий на воздухе при повышенных температурах, что объясняет светлый цвет изношенной поверхности. Следует отметить, что наличие в покрытиях боридов также снижает окисляемость металла упрочненного слоя при сухом трении, формируя светло-желтый цвет поверхности.

Наиболее распространенным видом изнашивания деталей машин, особенно рабочих органов сельскохозяйственных и почвообрабатывающих машин, является абразивное или ударно-абразивное изна-

шивание при скольжении по монолитному абразиву, удару по абразиву, воздействию абразивного потока либо движению в массе незакрепленных абразивных частиц [5]. К наиболее типичным деталям, подвергаемым абразивному изнашиванию можно отнести: узлы и детали бурильного оборудования и инструментов, бульдозеров, роторных траншейных экскаваторов, дорожно-строительных машин, зубья ковшей экскаваторов, детали сельскохозяйственных машин и другие.

Ряд исследований, проведенных с участием автора, показал эффективность применения магнитно-электрических покрытий при повышении износостойкости деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях абразивного или ударно-абразивного изнашивания [3].

Результаты испытаний покрытий на износостойкость в условиях абразивного изнашивания показали, что распределение их износостойкости с использованием рассматриваемых в работе порошковых материалов, носит несколько иной характер, нежели при трении скольжения (рис. 6, 7).

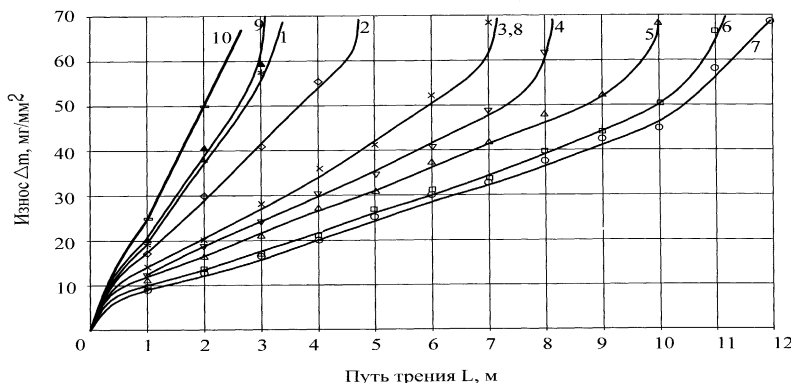


Рис. 6. Величина износа образцов при абразивном изнашивании покрытий из различных наплавочных материалов:

- 1 – порошок с содержанием бора 2,5 масс. %; 2 – порошок с содержанием бора 4,2 масс. %;
- 3 – порошок с содержанием бора 5,5 масс. %; 4 – порошок с содержанием бора 6,5 масс. %;
- 5 – порошок с содержанием бора 7,0 масс. %; 6 – порошок с содержанием бора 8,5 масс. %;
- 7 – порошок ПР-Х4Г2С2ФЮД; 8 – легированный чугун;
- 9 – ферробор ФБ-17; 10 – эталон (сталь 45); 1 – 6 – порошки по [4]; 8 – порошок по [2]

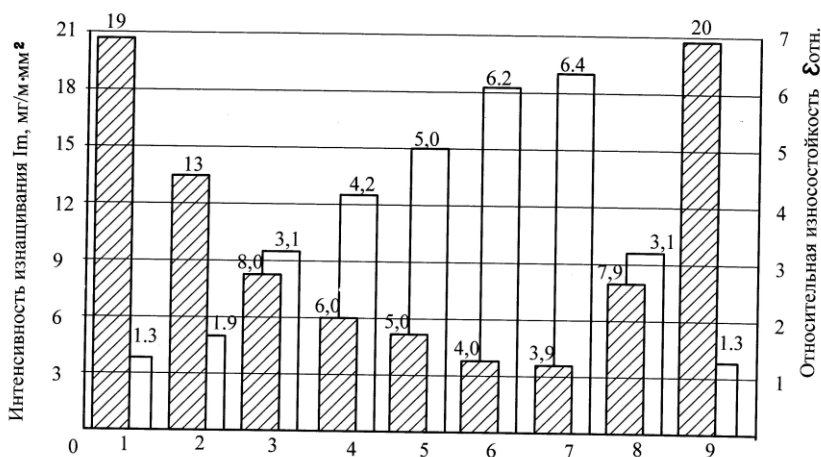


Рис. 7. Интенсивность изнашивания и относительная износостойкость покрытий при абразивном изнашивании:

- 1 – порошок с содержанием бора 2,5 масс. %; 2 – порошок с содержанием бора 4,2 масс. %;
- 3 – порошок с содержанием бора 5,5 масс. %; 4 – порошок с содержанием бора 6,5 масс. %;
- 5 – порошок с содержанием бора 7,0 масс. %; 6 – порошок с содержанием бора 8,5 масс. %;
- 7 – порошок ПР-Х4Г2С2ФЮД; 8 – легированный чугун; 9 – ферробор ФБ-17;
- 10 – эталон (сталь 45); 1 – 6 – порошки по [4]; 8 – порошок по [2];
- штриховка 45° – интенсивность изнашивания; без штриховки – относительная износостойкость

Так, наиболее высокую относительную износостойкость показали покрытия, нанесенные порошками ПР-Х4Г2С2ФЮД и ДЛ порошком с максимальным содержанием бора (8,5 масс. %). Для этих покрытий коэффициент относительной износостойкости равен 6,2...6,4. Несколько меньшую износостойкость показали покрытия, полученные из ДЛ порошков с содержанием бора 6,0...6,9 масс. %, показавших наилучшие результаты при испытаниях на износостойкость при трении скольжения (коэффициент относительной износостойкости составил 4,2 и 5,0). Очевидно, что при абразивном изнашивании, в от-

личие от изнашивания при трении скольжения, определяющую роль в износостойкости играет твердость покрытий. Именно поэтому в данном случае максимальную износостойкость показали наиболее твердые покрытия, полученные с помощью порошковых материалов марки ПР-Х4Г2С2ФЮД и ДЛ порошком с содержанием бора 8,5 масс. %.

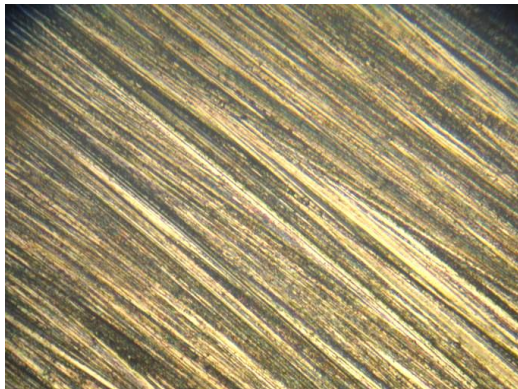


Рис. 8. Рельеф изношенной поверхности при абразивном изнашивании покрытия из порошка с содержанием бора 6,9 масс. %;  $\times 100$

Снижение в наплавочном материале количества легирующих элементов, и в первую очередь бора, приводит к монотонному снижению микротвердости покрытий и, соответственно, износостойкости при абразивном изнашивании.

Исследование рельефа изношенной поверхности показало классический характер абразивного изнашивания. На изношенной поверхности хорошо различимы мелкие царапины и углубления различной протяженности, ориентированные в направлении движения металла по отношению к абразиву (рис. 8).

Следует также отметить, что при абразивном изнашивании покрытий, полученных с использованием высоколегированных порошков, изношенная поверхность имеет светлый цвет без следов окисления, неизбежно возникающих при высоких температурах на операциях шлифования. Таким образом, разработанные ДЛ порошки обеспечивают не только высокую износостойкость, но и снижают их склонность к окислению атмосферным кислородом при работе в условиях высоких температур.

### Выводы

1. Выявлено влияние количества в наплавочном материале бора на износостойкость покрытий в условиях сухого трения скольжения. Установлено, что эта зависимость носит экстремальный характер и точкой экстремума, после которой начинается снижение износостойкости покрытий, является содержание в материале бора 6,5...7,5 масс. %. Испытания показали, что диффузионно-легированный порошок с содержанием бора  $6,9 \pm 0,1$  масс. % обеспечивает получение покрытий с максимальной износостойкостью, равной 100 м/мг, и оказывается лучше высоколегированного самофлюсующегося порошка ПР-Х4Г2С2ФЮД, показывающего износостойкость покрытий 67 м/мг. Это обусловлено гетерогенной структурой «белого» слоя, состоящей из вязкой матрицы и твердых мелкозернистых включений – боридов  $Fe_2B$  и  $FeB$ , в покрытиях, нанесенных разработанным порошком, в отличие от хрупких покрытий, полученных высоколегированным порошком.

2. Выявлено влияние количества в наплавочном материале бора на износостойкость покрытий в условиях абразивного изнашивания. Испытания выявили, что максимальную абразивную износостойкость имеют наиболее твердые покрытия, полученные магнитно-электрическим методом с использованием порошка ПР-Х4Г2С2ФЮД и разработанного ДЛ порошка с содержанием бора 8,5 масс. %. Максимальная износостойкость при этом составляет 6,2...6,5.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. – Мн.: Технопринт, 2001. – 300 с.
2. Самофлюсующийся материал для износостойких покрытий / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Люцко, Г.В. Петришин; заявитель Гомельский гос. ун-т им. П.О. Сухого. – № а 20040949; заявл. 15.10.2004 г.
3. Петришин Г.В., Пантелеенко А.Ф., Пантелеенко Е.Ф. Диффузионно-легированные порошки для магнитно-электрического упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 4. – С. 26 – 31.
4. Порошок для магнитно-электрического упрочнения / Ф.И. Пантелеенко, П.С. Гурченко, М.И. Демин, В.А. Люцко, Г.В. Петришин, Е.Ф. Пантелеенко, В.И. Сороговец, А.Ф. Пантелеенко; заявитель Полоцкий гос. ун-т. – № а 20050945; заявл. 03.10.2005 г.
5. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Нефть и газ, 1994. – 417 с.
6. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.