

УДК 621.923

Ф.И. Пантелеенко, Г.В. Петришин, Е.Ф. Пантелеенко

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЧУГУННОЙ ДРОБИ

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Беларусь

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого  
г. Гомель, Беларусь

*Microhardness and wear resistance data of magnet-electrical coatings made of self-fluxing diffusion-alloyed materials on the base of steel and iron shot is cited. The influence of chemical composition on wear resistance of coatings in dry sliding friction and abrasion wear conditions is shown.*

### ВВЕДЕНИЕ

Износостойкие покрытия, нанесенные магнитно-электрическим методом, обладают такими достоинствами, как высокая износостойкость в тяжелых условиях изнашивания, в том числе при наличии ударных нагрузок, в присутствии абразивных и агрессивных сред, хорошая адгезия наплавленного слоя к подложке, невысокая стоимость покрытий и простота технологии нанесения и применяемого технологического оборудования и оснастки. Технология магнитно-электрического упрочнения (МЭУ), известная достаточно давно, при этом не находила широкого применения ввиду особенностей наносимых покрытий. В первую очередь, сдерживающим фактором применения таких покрытий являлось низкое качество поверхностного слоя, проявляющееся в высокой шероховатости поверхности и низком коэффициенте сплошности. При этом невысокая толщина покрытий, соизмеримая с припуском на шлифование, не позволяет применять дополнительную операцию финишной механической обработки для повышения качества поверхности нанесенных покрытий.

В то же время, известно успешное применение в данной технологии самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков (ДЛП) на основе дроби из стали 40Л [1–3]. Исследования [1, 3] показали, что применение самофлюсующихся порошков на железной основе позволило существенно повысить как качество наносимых покрытий, так и их физико-механические свойства. Однако стальная дробь, являющаяся сырьем для производства самофлюсующихся порошков, в отличие от чугуновой, не столь широко распространена на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь и, в частности, Гомельского региона, где и расположены основные предприятия, заинтересованные во внедрении в производство рассматриваемой технологии. Ввиду этого представляет интерес разработка самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков на основе чугуновой дроби и исследование свойств покрытий из таких материалов, которые до сих пор в технологии МЭУ не применялись.

В данной работе приведены результаты исследований физико-механических свойств покрытий из борированных самофлюсующихся порошков на основе стальной (сталь 40Л) и чугуновой дроби.

**Цель работы.** Исследование дюрометрических и триботехнических свойств магнитно-электрических покрытий из самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков на основе стали и чугуна для оценки возможности применения более распространенной

чугунной дроби в качестве сырья при производстве самофлюсующихся порошков для технологии МЭУ.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Износостойкие покрытия наносились на лабораторной установке на плоские образцы из стали 45 ГОСТ 1050-88 с размерами 10×10×110 мм. Для нанесения покрытий использовали порошки на основе стальной дроби (заявка № а 20050945 от 03.10.2005) и на основе чугунной дроби. Микротвердость покрытий определяли по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,987 и 1,974 Н. Микрошлифы для исследований изготавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 9,302-79, при этом образцы предварительно заливали в обойму эпоксидной смолой. Исследования износостойкости проводили по двум методикам. Сравнительные испытания на износостойкость при трении скольжения исследовали на машине трения СМЦ-2 по методу Шкода-Савина [4] при следующих условиях 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  $Ra$  10...12,5 мкм. Эталон служил образец из стали 45 ГОСТ 4543-71 твердостью HRC 45...50. Для определения износостойкости в условиях абразивного изнашивания приводились сравнительные испытания на машине трения типа Х4-Б специальной конструкции [4]. Испытания проводили при трении о закрепленный абразив в соответствии с ГОСТ 17367-71. В качестве абразива использовали шлифовальную шкурку П2Г 43А 2СНМ ГОСТ 6456-82.

Интенсивность изнашивания  $I_m$  оценивали по потере массы на единицу длины пути трения:

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

Среднее значение  $I_{m, \text{ср}}$  получали по результатам пяти опытов.

Износостойкость  $\epsilon$  определяли величиной, обратной интенсивности изнашивания

$$\epsilon = 1 / I_m \text{ (м/мг)} \quad (2)$$

Относительная износостойкость  $\epsilon_{\text{отн}}$  определялась отношением износостойкости покрытия  $\epsilon$  к износостойкости материала эталона  $\epsilon_{\text{эт}}$

$$\epsilon_{\text{отн}} = \epsilon / \epsilon_{\text{эт}} \quad (3)$$

Путь трения  $L$ , м, определяли по формуле

$$L = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \tau$$

где  $d$  – диаметр диска, мм;  $n$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>;  $\tau$  – время испытания, мин.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования микроструктуры нанесенных покрытий показали, что при правильном выборе режимов наплавки, магнитно-электрические покрытия из борированных самофлюсующихся порошков на основе чугунной дроби имеют такую же гетерогенную структуру, характерную для покрытий из самофлюсующихся порошков на основе стали (рис. 1).

Как видно на фотографии микроструктуры (рис. 1), магнитно-электрические покрытия состоят из металлической матрицы с равномерно распределенными по ее объему кристаллами боридов железа  $Fe_2B$  (после травления азотной кислотой на микроструктуре они видны как светлые кристаллы на фоне темной металлической матрицы). Однако исследования микротвердости нанесенных покрытий из порошков на основе чугунной и стальной дроби показали, что при их внешней схожести физико-механические свойства все-таки отличаются. Твердость боридов железа одинакова в покрытиях из обоих типов порошков; при попадании алмазной пирамидки на металлическую матрицу заметна разница в их микротвердости (см. таблицу).

Таблица. Микротвердость структурных фаз магнитно-электрических покрытий

|   | Покрытия из ДЛП на основе стальной дробы | Покрытия из ДЛП на основе чугунной дробы |
|---|--|--|
| Микротвердость боридов железа $\text{Fe}_2\text{B}$ , ГПа | 14,3...15,1                              | 14,5...15,1                              |
| Микротвердость матрицы, ГПа                               | 6,9...7,3                                | 8,0...8,7                                |

Более высокая микротвердость матрицы в покрытиях из ДЛП на основе чугунной дробы, по-видимому, обусловлена наличием большого количества в наплавочном материале углерода, вследствие чего при быстром охлаждении расплава наряду с боридами образуются карбиды железа, которые и повышают микротвердость матрицы.

Испытания на износостойкость при трении скольжения без смазки также показали, хоть и незначительное, отличие скорости изнашивания покрытий из порошков на основе чугунной и стальной дробы с одинаковым содержанием бора. Как видно из графика (рис. 2), скорости изнашивания покрытий из ДЛП на основе чугуна хоть и коррелируют со скоростями изнашивания покрытий из порошков на основе стали [3], но максимальную износостойкость при данных условиях испытаний показывают покрытия из наплавочных материалов обоих типов с различным содержанием бора.

На графиках, характеризующий массовый износ исследуемых образцов, видно, что кривая изнашивания имеет классический вид. Период приработки фрикционной пары в данном случае составляет 500...600 м (примерно 5 минут испытаний). Достаточно высокое значение износа покрытий на данном участке испытаний объясняется быстрым изнашиванием микронеровностей ввиду малого пятна контакта поверхностей и, соответственно, большого удельного давления. Наибольший интерес с целью оценки повышения срока службы деталей представляет участок равномерного изнашивания. Исследования показали,

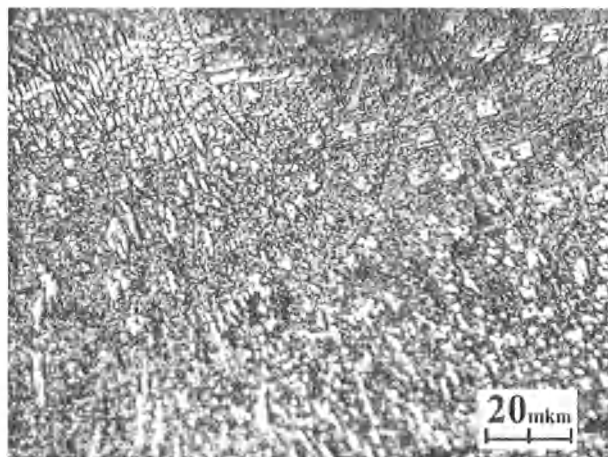


Рис. 1. Микроструктура покрытия, нанесенного методом МЭУ из борированной чугунной дробы,  $\times 200$

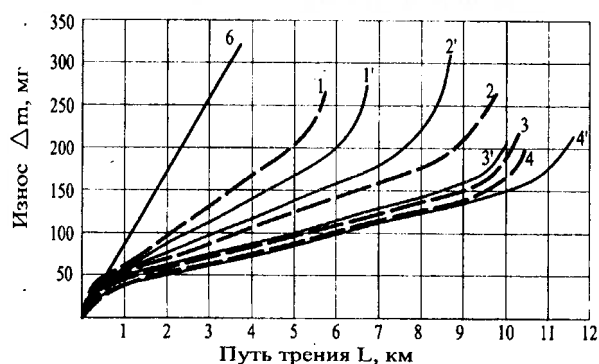


Рис. 2. Величина износа образцов при трении скольжения без смазки: 1, 2, 3, 4 – покрытия из порошка на основе чугунной дробы с содержанием бора 4,2; 5,5; 6,5; 7,0 масс.% соответственно; 1', 2', 3', 4' – покрытия из порошка на основе стальной дробы с содержанием бора 5,5; 6,5; 7,0; 8,5 масс.% соответственно; 6 – эталон

что на данном участке максимальную износостойкость покрытий обеспечивает порошок на основе стали с содержанием бора  $6,9 \pm 0,1$  масс.%, что соответствует более ранним исследованиям [3], и порошок на основе чугуновой дробы с содержанием бора  $6,5 \pm 0,1$  масс.%. Скорость изнашивания покрытий из данных порошков составляет 10 мг/км при скорости изнашивания эталона в тех же условиях 80 мг/км. Таким образом, относительная износостойкость таких покрытий равна 8 (рис. 3). Скорость изнашивания покрытий из менее легированных порошков находится в пределах 15...60 мг/км.

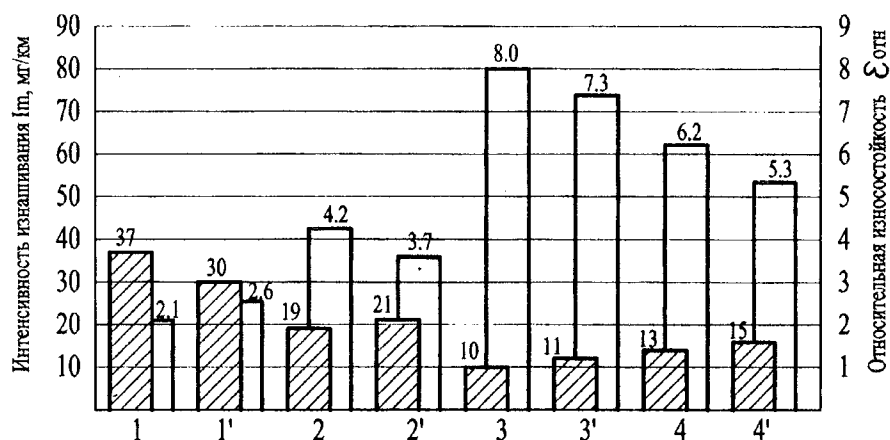


Рис. 3. Интенсивность изнашивания и относительная износостойкость при трении скольжения без смазки: 1, 2, 3, 4 – покрытия из порошка на основе чугуновой дробы с содержанием бора 4,2; 5,5; 6,5; 7,0 масс.% соответственно; 1', 2', 3', 4' – покрытия из порошка на основе стальной дробы с содержанием бора 5,5; 6,5; 7,0; 8,5 масс.% соответственно

Высокую износостойкость обеспечивают избыточные бориды  $Fe_2B$ , обладающие высокой твердостью. Кроме того, бориды и их оксиды, образующиеся в процессе изнашивания, имеют минимальную склонность к схватыванию с конструкционными материалами [5]. Порошки с меньшим содержанием бора не обеспечивают образования достаточного количества боридов железа, вследствие чего покрытия из таких порошков показывают меньшую износостойкость. Однако превышение содержания бора в наплавочном материале свыше 6,5...7 масс.% приводит к снижению износостойкости при данных условиях испытаний. Связано это с охрупчиванием избыточных боридов, их выкрашиванием и шаржированием изнашиваемой поверхности. На основании вышеизложенного можно утверждать, что в износостойкости при трении скольжения без смазки основную роль играют избыточные бориды  $Fe_2B$  (рис. 1), а твердость матрицы оказывает несущественное влияние на скорость и характер изнашивания. Однако испытания все же показали смещение точки экстремума кривой влияния содержания бора в наплавочном материале на износостойкость нанесенных покрытий из порошков различных типов (рис. 4). Объясняется это меньшей пластичностью материала металлической матрицы покрытий из борированной чугуновой дробы, вследствие чего хрупкие избыточные бориды, образующиеся уже при 6,5 масс.% бора, раньше выкрашиваются, шаржируют поверхность трения и приводят к ускоренному изнашиванию поверхности.

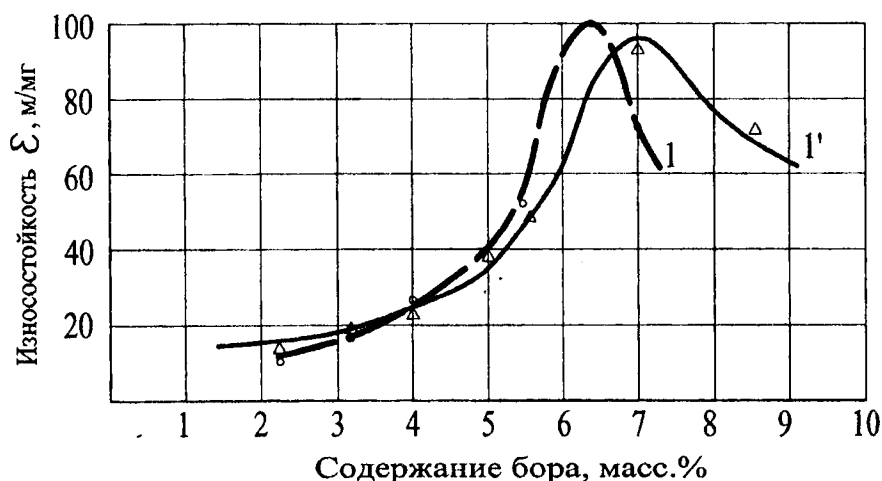


Рис. 4. Влияние содержания бора в ДЛП на износостойкость покрытий в условиях трения скольжения без смазки для борированных: 1 – чугуновой дробь; 1' – стальной дробь

Испытания магнитно-электрических покрытий в условиях абразивного изнашивания, характерного для рабочих органов сельскохозяйственных машин, показали, что борированные порошки на основе чугуновой дробь показывают более высокую износостойкость, чем порошки с таким же содержанием бора на основе стальной дробь (рис. 5). При этом анализ экспериментальных данных показал, что в условиях абразивного изнашивания отсутствует экстремум износостойкости от содержания бора в наплавочном материале, отмеченный при трении без смазки.

Так, максимальную износостойкость показали покрытия из порошков на основе стали и чугуна с содержанием бора 8,5 масс.%, и 7,0 масс.% соответственно. Для этих покрытий коэффициент относительной износостойкости равен 6,2...6,4.

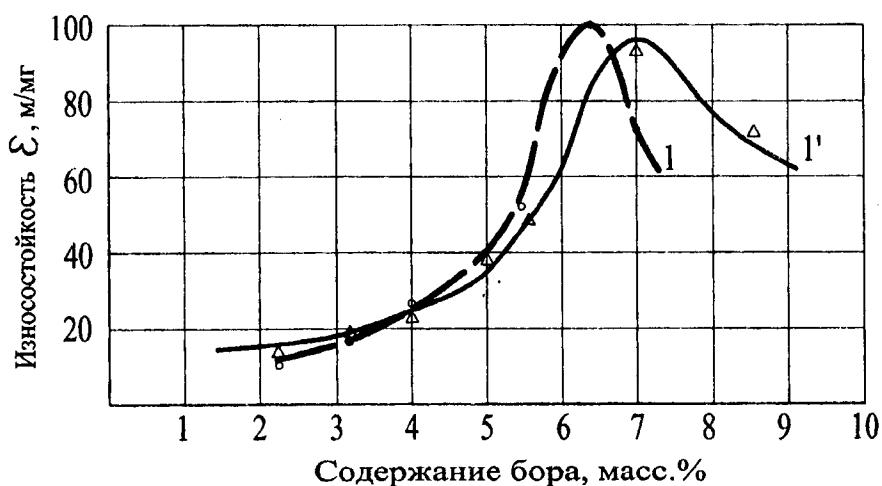


Рис. 5. Интенсивность изнашивания и относительная износостойкость при абразивном изнашивании: 1, 2, 3, 4 – покрытия из порошка на основе чугуновой дробь с содержанием бора 4,2; 5,5; 6,5; 7,0 масс.% соответственно; 1', 2', 3', 4' – покрытия из порошка на основе стальной дробь с содержанием бора 5,5; 6,5; 7,0; 8,5 масс.% соответственно

Несколько меньшую износостойкость показали покрытия, показавшие минимальную скорость изнашивания при сухом трении скольжения (рис. 5). Очевидно, что при абразивном изнашивании, в отличие от изнашивания при трении скольжения без смазки, определяющую роль в износостойкости играет твердость покрытий, а так как контакт с абразивной частицей в равной степени происходит как по избыточным боридам, так и по металлу матрицы, покрытия с большей твердостью последней обладают и большей износостойкостью. Этим и объясняется более высокая износостойкость покрытий из порошковых материалов на основе чугунной дробы. Снижение в ДЛП содержания бора приводит к монотонному снижению микротвердости покрытий и, соответственно, к снижению их износостойкости в условиях абразивного изнашивания.

### ВЫВОДЫ

Проведен сравнительный анализ дюрометрических и трибомеханических свойств магнитно-электрических покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов на основе стальной и чугунной дробы. Показано, что самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на основе чугунной дробы обеспечивают получение покрытий с гетерогенной структурой, подобной структуре покрытий из борированных порошков на основе стальной дробы. Установлено, что при одинаковой микротвердости боридов железа в покрытиях из ДЛП на основе стальной и чугунной дробы микротвердость металлической матрицы покрытий из порошков на основе чугуна выше и достигает 8,0...8,7 ГПа.

Выявлено, что покрытия из борированной чугунной дробы обладают износостойкостью, близкой по значению с износостойкостью покрытий из порошков на основе стали. Установлено влияние содержания в наплавочном материале бора на износостойкость при трении скольжения без смазки. Эта зависимость носит экстремальный характер и точкой экстремума, после которой начинается снижение износостойкости покрытия, является: для покрытий из порошков на основе чугунной дробы 6,5...7,0 масс.%, для покрытий из порошков на основе стальной дробы 7,0...7,5 масс.%. Минимальную скорость изнашивания покрытий, равную 10 мг/км, обеспечивают самофлюсующиеся порошки на основе чугунной дробы с содержанием бора  $6,5 \pm 0,1$  масс.% и порошки на основе стальной дробы с содержанием бора  $6,9 \pm 0,1$  масс.%.

Установлено влияние химического состава исследуемых наплавочных материалов на абразивную износостойкость нанесенных покрытий. С увеличением содержания бора в наплавочном материале растет микротвердость покрытий и их износостойкость в условиях абразивного изнашивания, при этом максимальная относительная износостойкость составила значение 6,2...6,4 для покрытий из порошков на основе чугунной и стальной дробы с содержанием бора 7,0 масс.% и 7,5 масс.% соответственно.

Показано, что применение самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков на основе более распространенной чугунной дробы обеспечивает получение магнитно-электрических покрытий с высокой износостойкостью в условиях трения скольжения без смазки и абразивного изнашивания, что позволяет говорить об их эффективном использовании в повышении срока службы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

### Список использованных источников

1. Петришин, Г.В. Диффузионно-легированные порошки для магнитно-электрического упрочнения / Г.В. Петришин, А.Ф. Пантелеенко, Е.Ф. Пантелеенко // Упрочняющие технологии и покрытия. № 4, 2006. – С. 26–31.
2. Исследование износостойкости покрытий из ферромагнитных порошков в условиях трения скольжения со смазкой / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. № 4, 2004, – С. 39–42.

3. Петришин, Г.В. Особенности изнашивания магнитно-электрических покрытий из самофлюсующихся порошков в различных условиях эксплуатации. / Г.В. Петришин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Материаловедение. № 12, 2006, – С. 107–112.

4. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – 300 с.

5. Виноградов, В.Н. Износостойкость сталей и сплавов: Учеб пособие для вузов / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин. – М.: Нефть и газ, 1994. – 417 с.

УДК 621.7;621.373.826

С.М. Босяков<sup>1</sup>, А.И. Веремейчик<sup>2</sup>, М.И. Сазонов<sup>2</sup>,  
В.М. Хвисевич<sup>2</sup>, К.С. Юркевич<sup>1</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет  
г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Брестский государственный технический университет  
г. Брест, Беларусь

*Results of researches of plasma surface hardening of stainless steel by means of a moving plasma arc are presented. Modelling process of hardening of samples with the purpose of definition of parameters of treatment for various materials is realized.*

В работах [1–5] отмечено, что поверхностное упрочнение сталей с помощью плазменного источника нагрева является перспективным, но недостаточно изученным процессом. Судя по литературным источникам, исследователи уделяют больше внимания процессам упрочнения с помощью лазера и электронного луча. Однако для тех и других способов упрочнения представляет интерес исследования зоны влияния, микроструктуры, твердости, температурных полей в области нагрева, скоростей нагрева и охлаждения металла при движущемся локальном источнике тепла. Как известно, воздействие высококонцентрированных источников нагрева на поверхность стальных изделий приводит к структурным, фазовым и аллотропическим превращениям в металле. В этой связи изучение влияния тепловых процессов на формирование упрочненного поверхностного слоя с целью получения оптимальных прочностных и износостойких свойств, обусловленных этими превращениями представляет важную задачу.

Для анализа теплофизических параметров в поверхностном слое металла необходимо подобрать оптимальные режимы процесса упрочнения, которые зависят от характеристик генератора плазмы: тока дуги, напряжения дуги, рода защитного и плазмообразующего