



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-148-152>
УДК 621.793, 620.183

Поступила 04.12.2025
Received 04.12.2025

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

Е. Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: panteleyenkofi@bntu.by
РЭН ПЕНЧЕН, компания Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co., Ltd, г. Яньтай, Китайская Народная Республика. E-mail: 1572669241@qq.com
Г. В. ПЕТРИШИН, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48

Методом магнитно-электрического упрочнения с использованием композиций диффузионно-легированных порошков на основе железа и просеянной стружки сплава Ni70Cr18SiB4 получены новые покрытия, отличающиеся сегрегацией слоев или двухслойностью. Изучены особенности их структуры и свойства. Такие покрытия целесообразно использовать для деталей, работающих в агрессивных средах, к которым предъявляются особые требования к поверхности (например, высокая коррозионная стойкость).

Ключевые слова. Магнитно-электрическое упрочнение, биметаллические покрытия, диффузионно-легированный порошок на основе железа, микроструктура, микротвердость.

Для цитирования. Пантелеенко, Е. Ф. Биметаллические покрытия, полученные методом магнитно-электрического упрочнения // Е. Ф. Пантелеенко, Рэн Пенчен, Г. В. Петришин // *Литье и металлургия*. 2026. № 1. С. 148–152. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-148-152>.

BIMETAL COATINGS RECEIVED VIA MAGNETIC-ELECTRIC HARDENING

E. F. PANTELEYENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: panteleyenkofi@bntu.by
REN PENGCHENG, Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co., Ltd, Yantai, People's Republic of China. E-mail: 1572669241@qq.com
G. V. PETRISCHIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus, 48, Oktyabrya ave.

New coatings characterized by layer segregation or two-layer construction were obtained using magnetic-electric hardening using mixtures of diffusion-alloyed iron-based powders and sieved Ni70Cr18SiB4 alloy chips. Their structure and properties were studied. Such coatings are suitable for use on parts operating in aggressive environments that have special surface requirements (for example, high corrosion resistance).

Keywords. Magnetic-electric hardening, bimetallic coatings, diffusion-alloyed iron-based powder, microstructure, microhardness.

For citation. Panteleyenko E. F., Ren Pengcheng, Petrischin G. V. Bimetal coatings received via magnetic-electric hardening. *Foundry production and metallurgy*, 2026, no. 1, pp. 148–152. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-148-152>.

Введение

Основным направлением развития в области получения функциональных поверхностей деталей машин с заданными свойствами является совершенствование технологий нанесения покрытий и отделочной обработки, в том числе разработка качественно новых материалов и инструментов для их осуществления. Широкий спектр технологий нанесения покрытий предполагает использование наплавочных материалов в виде порошков. Многие предприятия Республики Беларусь выступают крупными потребителями таких порошков, зачастую закупая их у импортных производителей. Одновременно эти же предприятия производят дисперсные металлические отходы в виде дроби размером менее 1 мм, стружки различных сплавов. Поскольку предлагаемые импортными производителями наплавочные материалы для нанесения качественных покрытий достаточно дорогостоящие, актуальной задачей является разработка новых порошков методами моно- и комплексного диффузионного легирования для создания защитных и упрочняющих покрытий.

В данной работе для получения покрытий методом магнитно-электрического упрочнения (наплавки) [1] использовали композиции порошков, представляющих собой дисперсные металлические отходы, а именно диффузионно-легированные отходы производства дробы колотой чугуной (ДЧК) [1–3] и стружку сплава H70X18CP4.

Различные методы высокоэнергетического воздействия для нанесения покрытий создают отличающиеся условия: температуру и время нагрева, концентрацию энергии, что оказывает непосредственное влияние на такие важные характеристики, как сплошность и однородность покрытия, его структуру, величину зоны термического влияния (ЗТВ), качество зоны сплавления покрытия с подложкой. Поэтому изучение влияния способа нанесения на структуру и свойства покрытия, несомненно, представляет научный интерес. Считается, что лазерная наплавка имеет минимальную ЗТВ, так как требует наименьшего тепловложения. Однако магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) создает еще меньшую ЗТВ, что обусловлено особенностями нанесения покрытия из порошковых материалов данным способом. Плавление – это импульсный процесс: частицы порошка выстраиваются в магнитном поле в цепочку, соединяя подложку, установленную на магнитной плите, и ротор, таким образом замыкая цепь и локально плавясь вследствие короткого замыкания. Процесс наплавки можно охарактеризовать как взрывной – расплавленные частицы, разлетаясь, прилипают к поверхности подложки [1]. Выбор порошков для получения покрытий, их физические и технологические свойства также накладывают свой отпечаток на протекание процесса МЭУ и, как результат, на структуру и свойства покрытия.

Материалы и методики

Нанесение магнитно-электрических покрытий на подложку из стали 50ХГСА осуществляли на лабораторной установке [1] при следующих параметрах: сила тока – 150 А, напряжение – 24 В, скорость подачи – 120 мм/мин, ширина ротора – 10 мм, величина зазора между ротором и деталью – 1 мм, частота вращения ротора – 63 об/мин, диаметр ротора – 160 мм. Использовали порошковую смесь фракции 315–400 мкм из борохромсилицированных отходов ДЧК (содержание углерода – 2,8%) и просеянной стружки сплава H70X18CP4 с различным массовым соотношением (покрытие № 1 – 50:50; № 2 – 80:20; № 3 – 90:10). Порошок насыпали на подложку без связующего, и он удерживался на поверхности за счет действия магнитной плиты, на которую установлена подложка. Поверхность предварительно не зачищалась. Образцы заливали в обойме эпоксидной смолой, шлифовали и полировали пастой ГОИ. Для травления использовали 5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Исследование микроструктуры проводили на высокотемпературном микроскопе Leica DM 2500 P, микротвердость измеряли на приборе METCON 3/6 согласно ГОСТ 9450-76.

Основная часть

При исследовании шлифов выявлено следующее: поверхностные слои покрытий, где в состав наносимой порошковой композиции входил порошок H70X18CP4, местами характеризуются наличием поверхностных трещин (рис. 1). В нетравящемся 5%-ном растворе азотной кислоты слое присутствуют наноразмерные поры величиной 300–350 нм. Толщина указанного слоя для покрытия № 1 составляет 65–145 мкм, а толщина промежуточного слоя – от 250 до 360 мкм. В покрытиях № 2 и 3 толщина хромоникелевого слоя соответственно меньше. Очевидно, что растрескиванию подвергалась область, где скопилась и закристаллизовалась хромоникелевая составляющая (рис. 1, в, г). Это можно объяснить различием коэффициентов теплового расширения у хромоникелевого сплава и сплава на основе железа: при остывании за счет усадки происходит растрескивание слоя, сформированного хромоникелевым сплавом.

Причиной такого явления может быть ряд факторов. Первый – отличие магнитных свойств порошка на хромоникелевой основе и порошка на основе железа (чистый никель является ферромагнетиком, однако добавление хрома в количестве 18% делает сплав слабомагнитным), ввиду чего при выстраивании частиц порошка в цепочку вдоль магнитных линий хромоникелевые частицы оказываются дальше от источника магнитного поля (подложки). Кроме того, точка Кюри у никеля – 358 °С, а у железа – 767 °С, что тоже может оказывать влияние на распределение расплавленных компонентов в процессе плавления и кристаллизации в условиях присутствующего магнитного поля. Еще одним фактором является хоть и незначительное, но отличие плотности двух материалов, что усугубляет сегрегацию и расслоение в смеси. Может играть роль и отличие коэффициентов теплового расширения.

То, что в наносимом МЭУ покрытии происходит расслоение, подтверждается и измерениями микротвердости. Для всех покрытий твердость внешнего нетравящегося слоя приблизительно одинакова

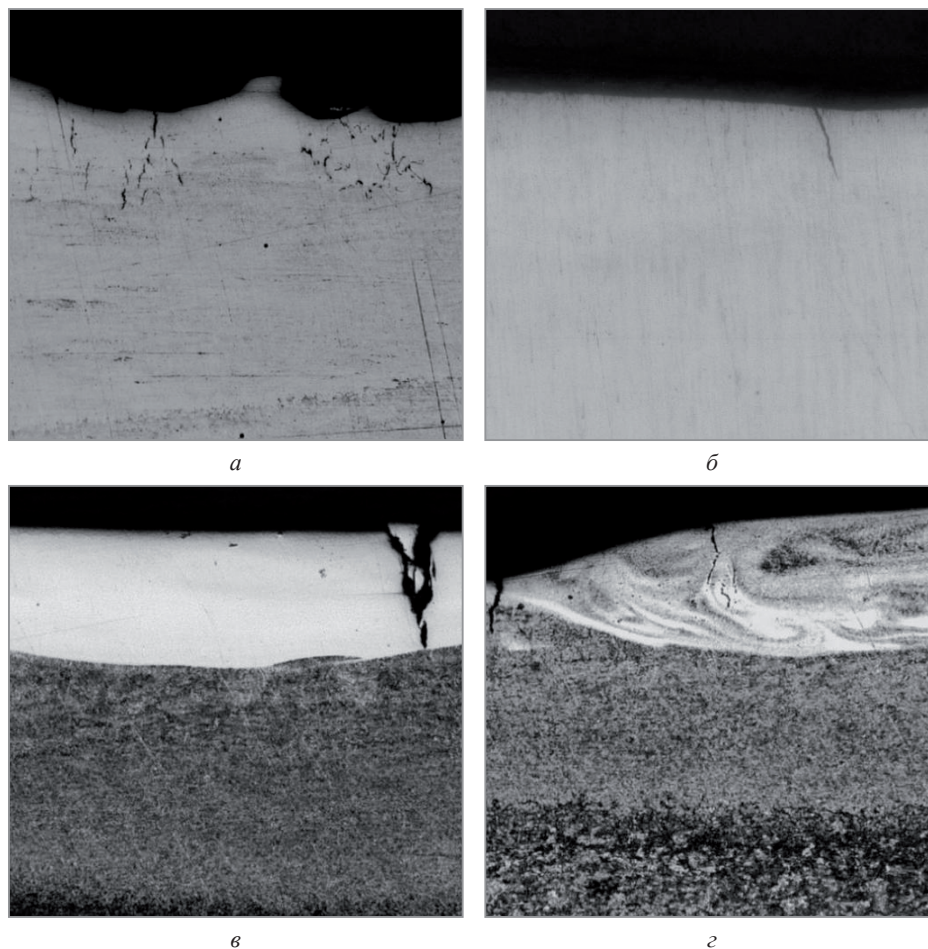


Рис. 1. Поверхностные трещины никельсодержащего слоя в покрытиях из композиции стружки H70X18CP4 и борохромсилицированной ДЧК: *а, б* – нетравленные шлифы; *в, з* – травленные шлифы. *а, в, з* – $\times 100$; *б* – $\times 200$

и составляет от 1004 до 1186 HV_{100} (на рис. 2, *а* сверху расположен хромоникелевый слой, внизу – подслоя из сплава на железной основе). Микротвердость подслоя (рис. 1, *з* посередине, рис. 2, *а* внизу и 2, *б* вверху), очевидно образовавшегося из борохромсилицированной ДЧК, составляет от 645 до 711 HV_{100} и соответствует твердости легированного бором, хромом и кремнием белого чугуна. То, что это именно нанесенный слой, а не подложка, подтверждается изменением микротвердости при переходе через границу разделения: подложка из стали 50ХГСА обладает твердостью в пределах 370–390 HV_{100} (рис. 2, *б* внизу).

Еще одной особенностью рассматриваемых покрытий является наличие мартенситоподобной структуры в промежуточном слое на основе железа (рис. 3), что можно объяснить особенностями процесса

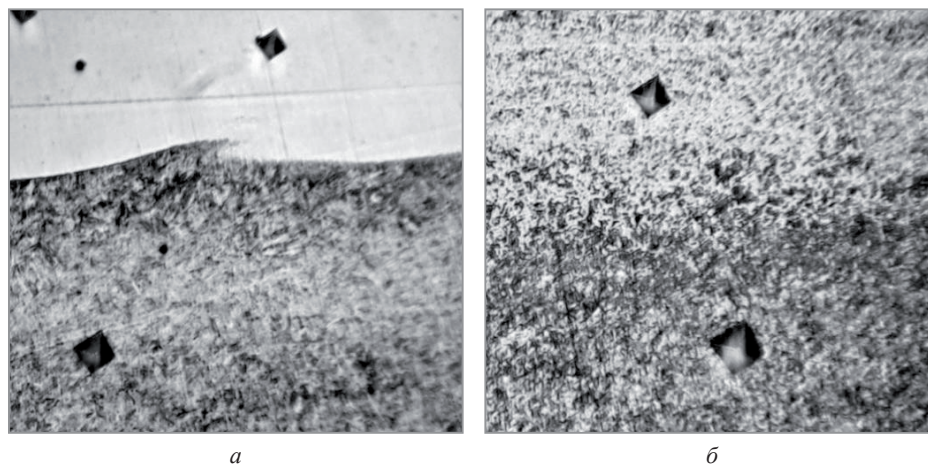


Рис. 2. Микротвердость слоев покрытия из композиции борохромсилицированных отходов ДЧК и стружки H70X18CP4: *а* – хромоникелевый слой и железосодержащий; *б* – железосодержащий слой и подложка. $\times 400$

нанесения: расплавленные микрообъемы наносимого материала вследствие быстрого теплоотвода массивной подложкой остывают со скоростью, выше критической, а наплавка последующих слоев (микрообъемов) не вызывает значительных температурных колебаний, которые могли бы привести к появлению отпущенной более равновесной структуры.

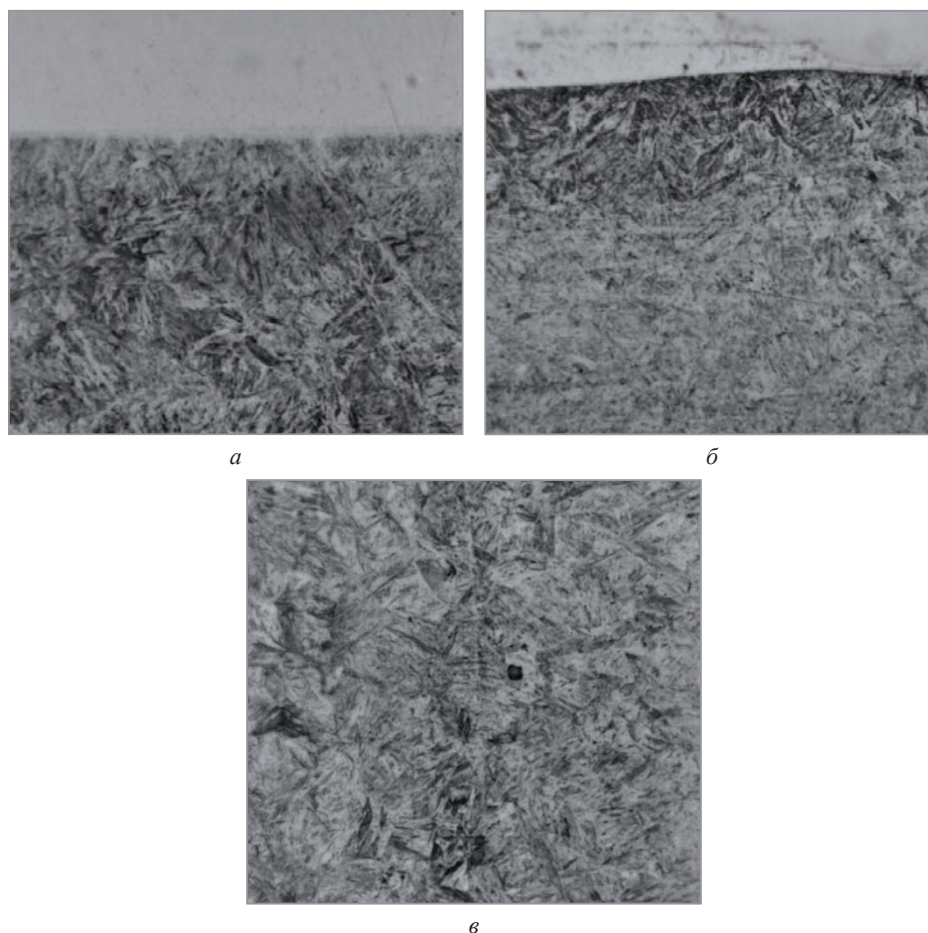


Рис. 3. Мартенситоподобная структура промежуточного слоя:
а – покрытие № 1; б – № 2; в – покрытие № 3. а, б – $\times 1000$; в – $\times 2000$

Выводы

1. Впервые методом магнитно-электрического упрочнения из композиций порошков на основе железа и хромоникелевого сплава получены двухслойные покрытия, отличающиеся наличием расслоения и четкой границы между нержавеющей (наружный) и железосодержащим слоями, исследованы особенности их структуры и свойства: наличие трещин в поверхностном слое из хромоникелевого сплава, мартенситоподобная структура промежуточного железосодержащего слоя. Возможные причины такого строения:

а) различие коэффициентов теплового расширения у хромоникелевого сплава и сплава на основе железа: при охлаждении за счет усадки происходит растрескивание слоя, сформированного хромоникелевым сплавом;

б) отличие магнитных свойств порошков на хромоникелевой основе и на основе железа (чистый никель является ферромагнетиком, однако добавление хрома в количестве 18% делает сплав слабомагнитным), ввиду чего при выстраивании частиц порошка в цепочку вдоль магнитных линий хромоникелевые частицы оказываются дальше от источника магнитного поля (подложки);

в) точка Кюри у никеля – 358 °С, а у железа – 767 °С, что также может оказывать влияние на распределение расплавленных компонентов в процессе плавления и кристаллизации в условиях присутствующего магнитного поля;

г) незначительное, но отличие плотности двух материалов, что еще больше усугубляет сегрегацию и расслоение в композиции.

2. Такие покрытия представляют интерес как защитные гетерогенные (биметаллические) для деталей, работающих в агрессивных средах, к которым предъявляются особые требования к поверхности

(например, повышенная коррозионная стойкость), попутно решаются важные проблемы импортозамещения и утилизации промышленных отходов.

3. Принимая во внимание наличие трещин в поверхностном хромоникелевом слое, необходимо отработать режимы МЭУ для повышения качества. Возможным решением данной задачи является применение сопутствующей и последующей термообработки для создания более равновесной структуры в промежуточном слое, чтобы сделать его более пластичным и избежать возможного отслаивания в процессе эксплуатации, а также снизить вероятность растрескивания наружного слоя, причины которой рассмотрены в настоящей работе и являются следствием существенных различий в свойствах наплавляемых сплавов-компонентов. Это станет предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петришин, Г.В.** Износостойкие гетерогенные покрытия из борированных наплавочных материалов на основе отходов стальной дроби, нанесенные магнитно-электрическим методом: дис. ... канд. техн. наук / Г.В. Петришин; ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2006. – 178 с.
2. **Пантелеенко, Е.Ф.** Самофлюсующиеся композиционные порошки из борированных отходов стальной и чугуновой дроби для магнитно-электрического упрочнения и восстановления деталей машин: дис. ... канд. техн. наук / Е.Ф. Пантелеенко; БНТУ. – Минск, 2009. – 163 с.
3. **Пантелеенко, Ф.И.** Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко. – Минск: Технопринт, 2001. – 300 с.

REFERENCES

1. **Petrishin G.V.** *Iznosostojkie geterogennye pokrytiya iz borirovannyh naplavochnyh materialov na osnove othodov stal'noj drobi, nanesennye magnitno-elektricheskim metodom: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Wear-resistant heterogeneous coatings from borated surfacing materials based on steel shot waste, applied by magnetic-electric method: dis. ... cand. of engineering sciences]. Gomel, 2006, 178 p.
2. **Panteleenko E.F.** *Samoflyusuyushchiesya kompozicionnye poroshki iz borirovannyh othodov stal'noj i chugunnoj drobi dlya magnitno-elektricheskogo uprochneniya i vosstanovleniya detalej mashin: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Self-fluxing composite powders from borated steel and cast iron shot waste for magnetic-electric hardening and restoration of machine parts: diss. ... cand. of engineering sciences]. Minsk, 2009, 163 p.
3. **Panteleenko F.I.** *Samoflyusuyushchiesya diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoj osnove i zashchitnye pokrytiya iz nih* [Self-fluxing diffusion-alloyed iron-based powders and protective coatings made from them]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2001, 300 p.