



The article is dedicated to solving of actual problem on creation of inexpensive alloying materials in the form of composite powders of the steel and cast iron grit waste by means of their diffusion alloying by boron.

Е. Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, В. Г. ЩЕРБАКОВ, БНТУ

УДК 621.762, 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ ОТХОДОВ СТАЛЬНОЙ И ЧУГУННОЙ ДРОБИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Введение

В настоящее время актуальной задачей является создание новых наплавочных материалов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства получаемого покрытия и отличающихся более низкой стоимостью по сравнению с уже существующими. Один из путей решения данной проблемы – использование в качестве сырья различных дисперсных металлических отходов. Идея вторичного использования отходов металлообработки была сформулирована и разрабатывалась еще в 60–70-е годы XX в. [1]. В Республике Беларусь ежегодно образуется большое количество дисперсных отходов: железосодержащая пыль, шлам, окалина, стружка, обрезь производства метизов и обработки проката, опилки, скрап, крошка, отходы литейного производства, проволока и др. Некоторые виды перечисленных отходов успешно применяются в качестве вторичного сырья для производства порошков. Однако отходы производства дробы не нашли использования и преимущественно отправляются в переплавку, хотя это нецелесообразно – происходит угар легирующих элементов, одновременно данные отходы являются почти готовым порошком.

Согласно концепции, выдвинутой авторами работы [1], для создания и рекомендации к производству дешевых порошков из отходов необходимо провести несколько этапов исследований: 1) изучение характеристик отходов в состоянии поставки; 2) разработка технологии переработки; 3) получение опытной партии порошка, определение его характеристик; 4) отработка технологии нанесения покрытий, определение характеристик последних; 5) внедрение в производство. Общим требованием для всех разрабатываемых материалов можно считать то, что технология их создания

должна быть простой, состоять из небольшого числа операций и стоимость порошковых материалов из отходов не должна существенно повышаться в процессе переработки и подготовки.

Цель данной работы – провести анализ исходных материалов в виде отходов производства дробы и создать из них новые порошки для применения в технологиях восстановления и упрочнения.

Материалы и методики исследований. Для исследования были выбраны отходы производства дробы: литой стальной – из стали 40Л производства РУП «Минский автомобильный завод», литой чугуновой – ДЧЛ 545 (ГОСТ 11964 – 81) производства ОАО «Могилевский металлургический завод» и ДЧЛ 08 (ГОСТ 11964 – 81) после использования для дробеструйной обработки на РУП «Минский завод шестерен».

Изучение гранулометрического состава проводили ситовым методом по ГОСТ 18318–73. Шлифы частиц и покрытий готовили в соответствии с требованиями ГОСТ 9.302–88. Морфологию и структуру порошков изучали с помощью оптических металлографических микроскопов МИ-1, Альтами МЕТ-1, спектрального электронного микроскопа Vega II LMU и растрового электронного микроскопа LEO1455VP. Микродюрометрические исследования проводили на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 2999-75).

Изучение диффузионного легирования отходов дробы

Согласно рекомендациям авторов [1], в первую очередь были проведены исследования характеристик отходов производства дробы. Химический состав всех исследуемых видов дробы главным образом отличается содержанием углерода: сталь 40Л содержит 0,37–0,4% С, 0,45–0,90% Мн, 0,20–0,52% Si, ≤ 0,06% S и P; ДЧЛ 545 – 2,7 – 3,0% С;

$0,6 \pm 0,2\%$ Mn, $\sim 1\%$ Si, $\leq 0,09$ S и P; ДЧЛ 08 – $2,9\text{--}3,5\%$ C, $0,40\text{--}0,70\%$ Mn, $1,20\text{--}2,00\%$ Si, $\leq 0,12\%$ S и P.

Анализ гранулометрического состава исследуемых материалов показал наличие высокого содержания частиц размерами от 200 до 630 мкм (97% стали 40Л, 64% ДЧЛ 545 и 55% ДЧЛ 08), пригодных для нанесения покрытий методами наплавки: ТВЧ, плазменно-порошковой и электромагнитной (магнитно-электрического упрочнения (МЭУ)) [3–5].

Исследование морфологии и структуры частиц из отходов производства стальной и чугунной дробы позволило выявить следующее:

- поверхность частиц гладкая, без трещин; частицы стали преимущественно сферической формы, частицы чугуна характеризуются более неправильной формой, на поверхности заметны углубления, которые, по-видимому, появляются при попадании капель воды на поверхность капель расплава, т. е. обусловлены особенностями технологического процесса производства дробы;
- на $\sim 30\%$ поверхности стальных и $\sim 20\%$ поверхности чугунных частиц присутствует оксидная оболочка толщиной от 3 до 65 мкм, которая в процессе рассева и транспортировки скалывается, переходя в более мелкую фракцию, тем самым понижая показатель степени сферичности последней;
- структура порошков вследствие быстрого их охлаждения в процессе производства дробы неравновесная: стальной порошок имеет структуру мелкоигольчатого мартенсита (3,5–15 мкм, рис. 1, а), чугунный – доэвтектического белого чугуна, состоящего из ледебурита и дендритных включений перлита различной дисперсности – от 1 до 15 мкм

(рис. 1, б). Примерно в 10% как стального, так и чугунного порошков обнаружено наличие дефектов в виде трещин и пор.

Микродюрометрические исследования частиц из стали 40Л показали, что микротвердость по всему сечению одинакова и составляет порядка 7200 МПа, что соответствует микротвердости мартенсита. Частицы чугуна характеризуются более высокой твердостью ($H_{50} = 8450$ МПа), что объясняется большим содержанием углерода. В поверхностной зоне микротвердость достигает значений $H_{50} = 9500$ МПа, поскольку при попадании капли расплава в воду на поверхности образуется повышенная доля твердой метастабильной фазы (ледебурита).

Борирование исследуемых материалов проводили в среде карбида бора с добавлением активатора AlF_3 в неподвижной (сталь 40Л, ДЧЛ 545) и подвижной порошковой средах (ДЧЛ 08).

Металлографические исследования частиц борированных порошков позволили сделать вывод об увеличении интенсивности диффузионного легирования чугунного порошка в 4 – 5 раз в случае ХТО в подвижной порошковой смеси, поскольку за счет постоянной пластической микродеформации происходит образование дефектов и измельчение зерна структуры и, как следствие, увеличение коэффициента диффузии [6].

Особенности борирования как стальных, так и чугунных частиц в неподвижной порошковой смеси заключаются в следующем: при малой продолжительности ХТО образуется однофазный боридный слой (Fe_2B), а при увеличении времени борирования – двухфазный ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$), что подтверждено рентгеновским фазовым и микродюрометрическим анализами частиц обработанных по-

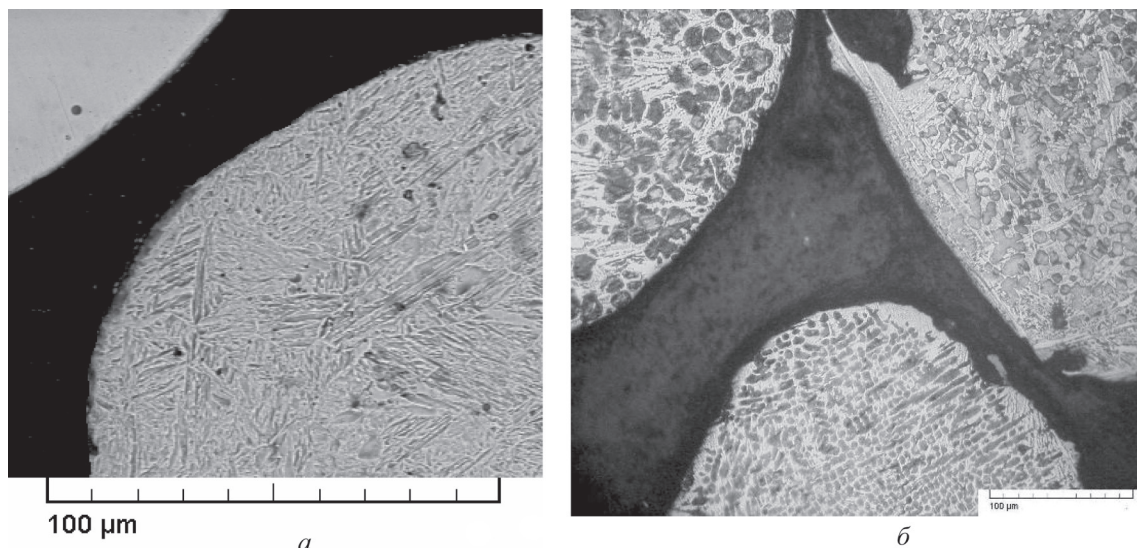


Рис. 1. Микроструктура частиц: а – стальной дробы; б – чугунной дробы

рошков. Исследование микротвердости показало, что в поверхностной зоне стальных частиц она составляет 19 500 МПа, что соответствует значению данного показателя для фазы FeB, по мере приближения к центру H_{μ} снижается до твердости фазы Fe₂B (14 250 МПа), а затем до значений, соответствующих микротвердости перлита (1600–2000 МПа). Известно, что увеличение содержания углерода приводит к снижению твердости боридных фаз [2], поэтому значения микротвердости таковых для порошка борированной чугунной дробы ДЧЛ 545 составляют 14 300 и 12 180 МПа для FeB и Fe₂B соответственно. Особенностью борирования ДЧЛ 08 в подвижной порошковой среде одновременно с ускорением диффузионных процессов является образование преимущественно однофазного боридного слоя (Fe₂B), о чем свидетельствует значение микротвердости поверхностного слоя, равное 12 500 МПа. Поскольку углерод горюч, то растущий боридный слой оттесняет его в центр частицы, где происходит постепенное возрастание содержания высокоуглеродистой фазы (цементита) в стальных частицах и образование графитных включений в чугунных частицах, причем явление графитизации характерно для обоих методов борирования.

Так как ХТО проводится при температуре, выше критической температуры A_{C1} (900 °С), то в стальных частицах происходят следующие процессы: мартенситная структура переходит в аустенитную, а затем при медленном охлаждении после ХТО в сердцевине частицы образуется перлито-ферритная структура (рис. 2, а); с ростом диффузионного слоя концентрация углерода в центральной зоне частицы возрастает и ее структура становится преимущественно перлитной (рис. 2, б); в подборидной зоне образуются включения карбоборидов, расположенные по границам бывших аустенитных зерен (рис. 2, б).

Отметим, что интенсивность роста толщины диффузионного слоя в частицах стали выше, чем в частицах чугуна, что объясняется различным содержанием углерода, снижающим интенсивность роста боридного слоя.

При борировании частиц чугуна как в неподвижной (ДЧЛ 545), так и в подвижной (ДЧЛ 08) порошковых смесях происходит процесс графитизации. Сравнительный анализ микроструктуры полученных порошков позволил выявить следующие различия (рис. 2, в, г).

1. Локализация графитных включений. При диффузионном легировании в неподвижной сме-

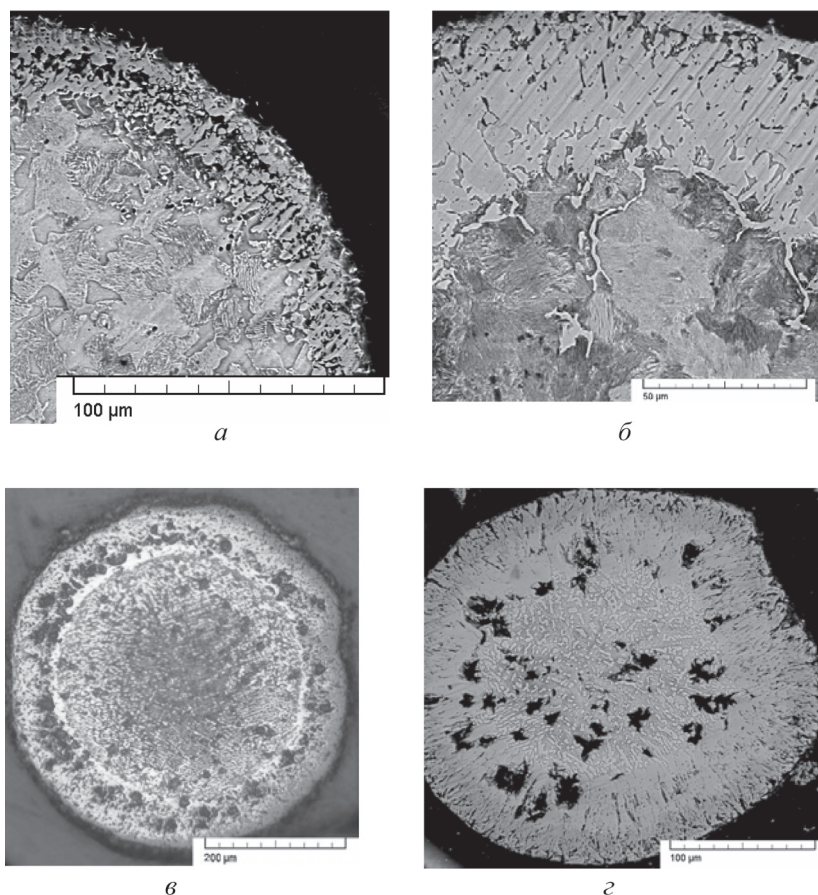


Рис. 2. Микроструктура борированных частиц стали 40Л (а, б) и чугуна (в, г)

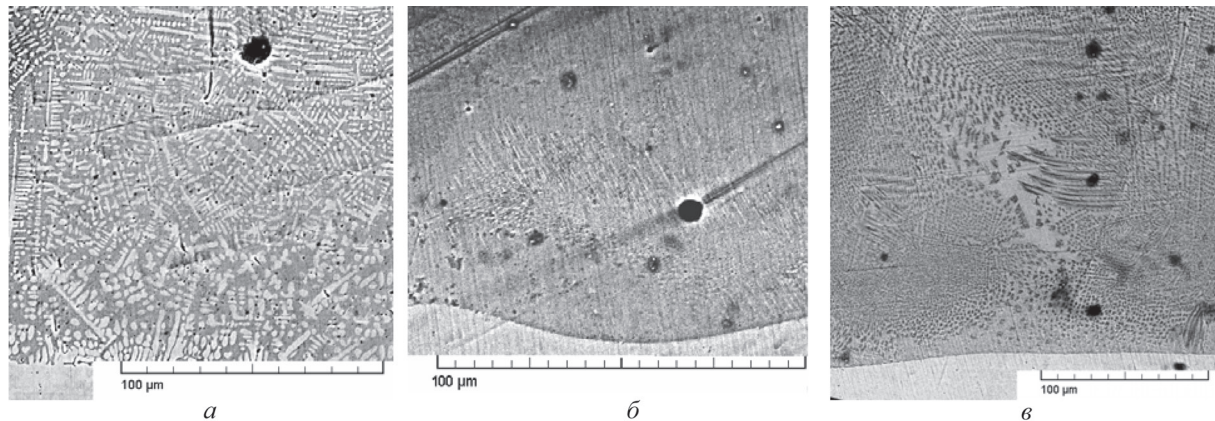


Рис. 3. Структура МЭУ-покрытий: из чугуна борированной дроби (а – доэвтектическая; б – эвтектическая; в – заэвтектическая)

си графитные включения располагаются в центре частицы. При борировании в подвижной смеси графитные включения находятся преимущественно в боридном слое или в переходной зоне, хотя встречаются и в центре частицы, как и при ХТО в неподвижной смеси. По-видимому, данный эффект связан с процессами поверхностной деформации частиц, в результате которых измельчается зерно, возрастает количество дефектов, которые, объединяясь, могут образовывать поры, куда диффундирует оттесняемый боридным фронтом углерод [7].

2. Размер включений графита. В случае борирования в неподвижной смеси размер включений варьируется от 5 до 20 мкм, в то время как при борировании в подвижной смеси данный показатель составляет 4–6 мкм, что опять же объясняется образованием большего количества дефектов, которые служат центрами графитизации.

3. Форма графитных включений. При наличии большого количества центров графитизации образуется большое количество включений шаровидного графита. При отсутствии постоянной пластической деформации наблюдается образование хлопьевидного графита.

Таким образом, установлено влияние условий ХТО на структуру борированных частиц.

Полученные порошки, как уже указывалось выше, целесообразно применять для восстановления и упрочнения методами наплавки (ТВЧ, плазменно-порошковой, электромагнитной).

Одним из перспективных способов нанесения покрытий из разработанного самофлюсующегося порошка является метод магнитно-электрического упрочнения, заключающийся в одновременном воздействии на наносимый порошок и упрочняемую поверхность нескольких энергетических факторов: электрического тока, внешнего магнитного поля, а иногда и механической нагрузки (обкатка

роликом и др.). В данной работе методом МЭУ были получены покрытия из порошка фракций 200–315 и 400–630 мкм, содержащих разное количество бора, мас.%. Технологический режим нанесения характеризовался следующими параметрами: частота вращения ротора $n = 60$ об/мин, подача образца $S = 200$ мм/мин, величина магнитной индукции $B = 0,2$ Тл, напряжение холостого хода $U_{х.х.} = 21$ В, сила тока $I = 120$ А, рабочий зазор $\delta = 0,7$ мм.

Структура покрытий преимущественно гетерогенная, состоящая из эвтектической матрицы (железо + цементит + борид железа) и избыточной фазы. В зависимости от содержания бора в наносимом порошке покрытия могут быть доэвтектические (содержание бора менее 12 мас.%, избыточная фаза – железо, рис. 3, а), эвтектические (содержание бора $12 \pm 0,5$ мас.%, полностью состоят из материала матрицы, рис. 3, б) и заэвтектические (содержание бора более 12 мас.%, избыточная фаза – бориды железа, рис. 3, в), что подтверждается результатами рентгеновского, фазового и микродюрметрического анализов.

Исследования износостойкости в условиях трения скольжения без смазки показали, что максимальной относительной износостойкостью, равной 8 (эталон – закаленная сталь 45, HRC 45–50), характеризуется заэвтектическое покрытие из порошка, содержащего 13 мас.% бора, а при повышении содержания избыточной фазы происходит снижение износостойкости, т. е. зависимость износостойкости от содержания боридов в покрытии носит экстремальный характер. Данный эффект связан с недостаточным содержанием материала связки: хрупкие избыточные бориды выкрашиваются, царапают поверхность трения и приводят к ускоренному изнашиванию поверхности.

При абразивном изнашивании износостойкость с повышением содержания боридов возрастает.

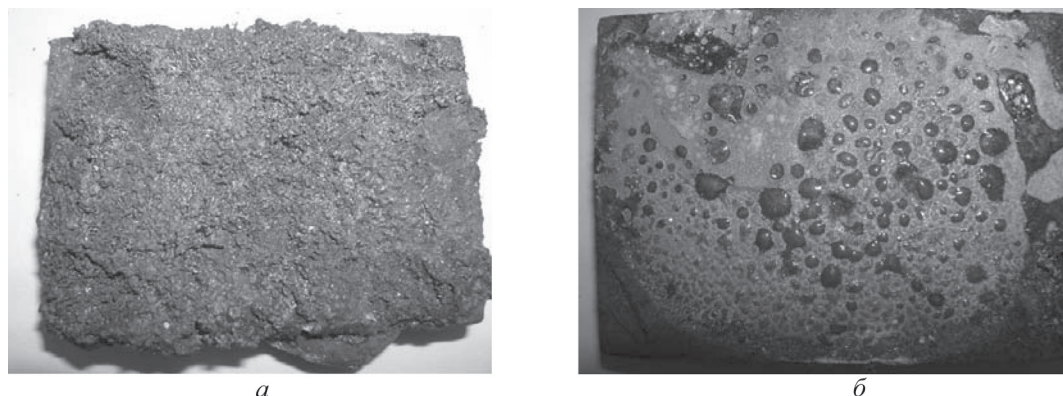


Рис. 4. Исследование наплавляемости: *а* – исходная дробь ДЧЛ 08; *б* – диффузионно-легированная дробь ДЧЛ 08

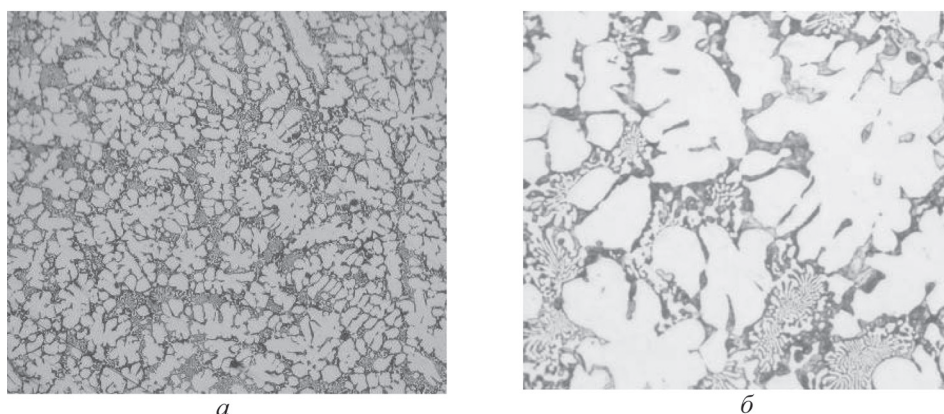


Рис. 5. Микроструктура слоя после наплавки смеси с борированной ДЧЛ 08: *а* – $\times 200$; *б* – $\times 1000$

тает, поскольку в данном случае определяющую роль играет количество боридной фазы, распределенной в более вязкой матрице, и функциональная нагрузка распределяется по избыточным боридам. Максимальным показателем относительной износостойкости 6,6 обладает покрытие из порошка с содержанием бора 13,4 мас. %.

Одним из возможных методов получения покрытий из разработанных порошков является индукционная наплавка, которая используется для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин на участке упрочнения РУП «Минский завод шестерен». В результате исследования наплавляемости полученных порошков установлено, что исходные отходы чугуновой дробы ДЧЛ 08, смешанные с ферросплавом, не оплавляются, а только интенсивно окисляются в процессе нагрева (рис. 4, *а*). Смеси диффузионно-легированных отходов чугуновой дробы с ферросплавом при индукционном нагреве оплавляются без окисления (рис. 4, *б*).

Наплавленный слой характеризуется доэвтектическим строением (рис. 5). Микротвердость наплавленных слоев составляет 60–62 HRC. Пористость в слое незначительная и составляет порядка 3–5%. У линии сплавления металл имеет четко выраженную дендритную структуру. В верхнем слое наплавленного металла содержатся включе-

ния первичных карбидов веерообразной формы. Также между наплавленным металлом и металлической основой обнаружена переходная зона, что также свидетельствует о сплавлении основы и слоя.

Микротвердость слоя составляет 7385–9780 МПа и связана с высокой степенью легированности ее фазовых составляющих [8]. В [2, 8, 9] показано, что микроструктуры эвтектического типа наиболее соответствуют для работы в условиях абразивного изнашивания.

В результате проведенных исследований установлено, что получаемые при использовании диффузионно-легированных отходов чугуновой дробы наплавочные покрытия по свойствам соответствуют предъявляемым РУП «Минский завод шестерен» требованиям к изготавливаемым на участке упрочнения рабочим органам почвообрабатывающих машин.

Следует отметить, что в 2007 г. годовая потребность завода в наплавочном порошке для наплавки на режущие органы почвообрабатывающих машин составляла 3,5 т.

Выводы

1. Проведены анализ и исследование характеристик отходов дробы (гранулометрического, химического состава, структуры), пригодных для производства наплавочных материалов в виде

порошка: в силу особенностей технологии производства дробы частицы порошка характеризуются неравновесной структурой (сталь 40Л – мелко-игольчатый мартенсит, ДЧЛ – доэвтектический белый чугун). Установлена возможность применения максимальной по содержанию фракции каждого вида отходов размерами от 200 до 630 мкм (97 % стали 40Л, 64% ДЧЛ 545 и 55% ДЧЛ 08) для методов восстановления наплавкой (ТВЧ, МЭУ, плазменно-порошковой).

2. Установлены особенности структуры борированных порошков из стальной и чугунной дробы и влияние на них метода ХТО (в подвижной и неподвижной порошковой смеси). Вследствие отеснения углерода вглубь боридным фронтом в стальных частицах структура ядра постепенно из феррито-перлитной превращает-

ся в перлитную. В частицах ДЧЛ после ХТО происходит процесс графитизации, причем выявлены различия формы, размера и локализации графитных включений для ХТО в подвижной и неподвижной смесях.

3. Показана возможность получения покрытий различными методами наплавки (ТВЧ и электромагнитной) из разработанных диффузионно-легированных бором порошков – отходов дробы. Установлено, что в связи с увеличением потребности РУП «Минский завод шестерен» в наплавочном порошке в 2008 г. использование диффузионно-легированной дробы ДЧЛ 08 для наплавки на режущие органы почвообрабатывающих машин может позволить получить экономический эффект от использования отходов дробы более 20 000 000 руб.

Литература

1. Б о р и с о в Ю. С. Порошки для газотермического напыления из отходов металлообработки: основы производства и перспективы применения // Порошковая металлургия. 1989. № 10. С. 25–30; С. М. Б а р и н о в, В. Я. Ш е в ч е н к о. Прочность технической керамики. М.: Наука, 1996.
2. В о р о ш н и н Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Мн.: Беларусь, 1981.
3. М р о ч е к Ж. А., К о ж у р о Л. М., Ф и л о н о в И. П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учеб. пособ. Мн.: УП «Технопринт», 2000.
4. Восстановление деталей машин: Справ. / Ф. И. Пантелеенко и др.; Под ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003.
5. П о л я к М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2-х т. Т. 1, 2. М.: ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение, 1995.
6. Ш т е м п е л ь О. П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: Дис. ... канд. техн. наук, Новополоцк, 2003.
7. Ж у р а к о в с к и й В. М. Организация трансформируемой структуры и обеспечение заданных свойств в графитсодержащей стали: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Мн., 1985.
8. К о н с т а н т и н о в В. М. Теоретические и технологические аспекты создания экономно-легированных защитных слоев из диффузионно-легированных сплавов // Вестн. БНТУ. 2007. № 2. С. 29–36.
9. В о р о ш н и н Л. Г., П а н т е л е е н к о Ф. И., К о н с т а н т и н о в В. М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. 2-е изд., перераб. и доп. Мн.: ФТИ, 2001.