

Глава 13. НОВЫЕ ДИФФУЗИОННО-БОРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

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

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого,
г. Гомель, Беларусь*

Технология магнитно-абразивной обработки

В настоящее время технология магнитно-абразивной обработки, разработанная еще в 1938 г., нашла применение в области финишной обработки точной оптики, в микроэлектронике, в машиностроении при обработке труднообрабатываемых, труднодоступных или сложнопрофильных поверхностей.

Магнитно-абразивная обработка (МАО) – абразивная обработка, осуществляемая при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле (согласно ГОСТ 23505-79 «Обработка абразивная. Термины и определения»).

Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса, уплотненная энергией магнитного поля, осуществляет абразивное воздействие на обрабатываемую деталь. Магнитное поле выполняет роль связки, которая формирует из отдельных зерен порошка эластичный абразивный инструмент, и обеспечивает силовое воздействие, с помощью которого зернам порошка сообщаются нормальные и тангенциальные силы резания. Магнитно-абразивным способом можно успешно обрабатывать различные поверхности: цилиндрические наружные и внутренние, плоские, тел вращения с криволинейной образующей, винтовые и др. [1].

Наиболее распространенной областью применения магнитно-абразивной обработки является снижение шероховатости на обрабатываемых поверхностях с одновременным повышением качественных характеристик поверхностного слоя.

Технология магнитно-абразивной обработки широко распространена за рубежом. Имеется ряд научных школ, занимающихся исследованием процесса финишной обработки несвязанным абразивом и использованием магнитного поля. Наиболее успешно технология магнитно-абразивной обработки, обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой MAF (magnetic-abrasivefinishing), применяется для обработки внутренних труднодоступных поверхностей [2]. Кроме того, имеется опыт обработки наружных поверхностей, имеющих сложный профиль: поверхности имплантатов в стоматологии, искусственные суставы и др. [3]. Отмечается, что магнитно-абразивная обработка является наиболее приемлемым способом финишной обработки металлических искусственных суставов, так как не создает регулярный микрорельеф поверхности, характерный для обработки жестким абразивным инструментом. Особенности механизма резания при магнитно-абразивной обработке позволяют получать низкую шероховатость поверхности, одинаковую во всех направлениях измерения [4]. Известен опыт применения технологии магнитно-абразивной обработки при полировании тонких пластин из бериллиевой бронзы толщиной от 0,15 мм [5]. В качестве источника магнитного поля, как правило, используются электромагниты постоянного тока, обеспечивающие формирование гибкого абразивного инструмента. Однако в последнее время, в связи с распространением постоянных магнитов большой мощности, стали активно применяться постоянные магниты. Это позволило создать компактные установки для МАО, способные обрабатывать внутренние поверхности малого сечения. Известны исследования, направленные на разработку устройств МАО на электромагнитах с переменным магнитным полем [6]. Однако подобные установки не получали широкого распространения в связи с трудностью управления переменным магнитным полем.

Материалы для магнитно-абразивной обработки

Высокая гибкость инструмента, щадящие условия обработки из-за отсутствия трения о связку абразивного инструмента, высокая производительность при стабильно высоком качестве обработки позволили данной технологии прочно занять

технологическую нишу в широкой гамме технологий и оборудования для финишной обработки материалов. При этом в последнее время основным сдерживающим фактором дальнейшего развития рассматриваемого метода обработки является сложность изготовления для нее ферроабразивных материалов, так как они должны обладать фактически противоположными свойствами: высокой твердостью и хорошими магнитными свойствами.

Сейчас в технологии магнитно-абразивной обработки используются ферробор, ферровольфрам, бористый чугун, крошка белого чугуна, стальные закаленные иглы, механические смеси магнитных и абразивных порошковых материалов. Данные материалы технологичны в производстве, но не обеспечивают высокую производительность и качество. Также при магнитно-абразивной обработке широко используются композиционные материалы, полученные спеканием ферромагнитной основы с абразивной составляющей [7]. Известны материалы, полученные химической металлизацией отдельных зерен электрокорунда белого ферромагнитными материалами (Fe, Ni, Ca) [7]. Данные материалы оказались значительно лучше своих предшественников с точки зрения производительности, но их стоимость значительно выше разработанных ранее аналогов, а также особенности технологии их изготовления не позволяют получать ультрадисперсные порошки с размером части 5...25 мкм для тонких доводочных операций при обработке прецизионных изделий.

В США распространение получили композиционные порошки, состоящие из ферромагнитной основы и зерен оксида алюминия, наносимых на ядро в плазменной струе [8]. Данные порошки по производительности аналогичны спеченным ферромагнитным абразивным материалам, однако обладают большей стойкостью, выдерживая значительно большее количество циклов обработки. Для обработки прецизионных внутренних поверхностей разработаны материалы фракции 5...25 мкм с частицами сферической формы, спеченные с мелкодисперсными техническими алмазами [9]. Данный порошок, обладая высокой текучестью, способен обрабатывать внутренние поверхности малого диаметра, и применяется для финишной обработки капиллярных трубок. Помимо данных материалов, при обработке капиллярных трубок используются магнитно-реологические жидкости, содержащие несвязанные между собой ферромагнитные и абразивные частицы размером 10...12 нм [10]. Однако данные материалы имеют высокую стоимость, малопродуктивны, а также не способны обрабатывать труднообрабатываемые материалы, так не обладают высокой твердостью.

В связи с этим важной задачей является создание новых материалов для магнитно-абразивной обработки, отличающихся высокой производительностью, хорошими магнитными свойствами, большой стойкостью (возможностью выдерживать как можно большее количество циклов обработки), а также низкой ценой.

Разработанные ранее мелкодисперсные диффузионно-борированные порошки из отходов производства дроби [11,12] (в частности чугунной колотой) отвечают этим требованиям и могут идеально подойти в качестве ферроабразивных материалов при любых видах магнитно-абразивной обработки: от грубого шлифования до полирования.

Основные требования к применяемым порошкам следующие: высокая производительность, магнитность, стойкость (возможность выдерживать как можно большее количество циклов обработки), а также доступность и возможность серийного производства. Всем этим требованиям соответствуют разработанные из отходов дроби материалы и подходят для любых видов магнитно-абразивной обработки: от грубого шлифования до полирования. Данный ферромагнитный материал обладает высокими магнитными свойствами, так ядро его частиц состоит из стали либо чугуна, и содержит большое количество железа. При этом боридная оболочка данных частиц представляет собой бориды железа FeB и Fe_2B , обладающих высокой твердостью. Вследствие этого борированный порошок на основе чугунной дроби может обладать высокими режущими свойствами и тем самым обеспечивать высокую производительность процесса.

Применение в качестве сырья дисперсных металлических отходов позволяет снизить стоимость данного материала, а также исключить дополнительно проводимые операции по измельчению дробы.

Сферическая форма частиц порошка определяет его хорошую полирующую и выглаживающую способность, что позволяет применять его при финишной обработке деталей с высокими требованиями по шероховатости. Ферромагнитный материал с частицами неправильной формы обеспечивает высокую производительность процесса и, в зависимости от размера частиц, может успешно применяться как при черновом шлифовании, так и при тонком шлифовании или полировании. Порошок более мелкой фракции (0,05...0,200 мм) может использоваться для полирования и тонкого шлифования ответственных деталей с высокими требованиями по точности и шероховатости. Порошки крупной фракции (0,20...0,64 мм) могут применяться при черновой магнитно-абразивной обработке деталей, в том числе имеющих сложный профиль. В этом случае обеспечивается высокая производительность процесса.

Исследования по оценке возможности использования борированных материалов на основе чугунной дробы позволили установить границы содержания в частицах порошка бора, при которых обеспечивается выполнение условий его применимости в технологии магнитно-абразивной обработки. Содержание бора в материале обусловлено минимальной и максимальной толщиной борсодержащей абразивной оболочки ферромагнитных ядер.

Установлено, что повышение количества бора в материале существенно не влияет на магнитные свойства порошка, несмотря на то, что повышается количество фаз FeB и Fe₂B, имеющих пониженные магнитные свойства, а также происходит графитизация растворенного в железе углерода, который также снижает магнитные свойства материала. При содержании бора менее 1,0 масс.% толщина боридного слоя столь незначительна, что не оказывает существенного влияния на абразивные свойства материала вследствие быстрого изнашивания этого слоя в процессе обработки.

Магнитные свойства диффузионно-борированных порошков на основе отходов чугунной дробы

Исследование магнитных свойств порошка осуществляли с применением магнетометра с вибрирующим образцом фирмы Lakeshore, результатом эксперимента стало построение петель гистерезиса для различных порошков. В качестве образцов были выбраны диффузионно-борированные порошки фракции 400-630 мкм из колотого отбеленного серого чугуна СЧ 20 с частицами неправильной формы – исходный и подвергнутый химико-термической обработке – диффузионному борированию. Условия их борирования, толщина боридного слоя и количество бора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Порошок для исследования магнитных свойств

Фракция, мкм, материал порошка	Продолжительность диффузионного борирования, часов	Температура диффузионного борирования, °С	Объемное содержание боридной фазы в порошке, %	Массовое содержание бора в порошке, %
400 – 630 чугун СЧ20, отбеленный	2	900	40,2	4,4
	3		55,4	6,1
	4		64,9	7,3

Для указанных в таблице порошков, имеющих различное количество боридной фазы как по объему, так и по массовому содержанию бора, были построены петли гистерезиса, характеризующие магнитные свойства материала.

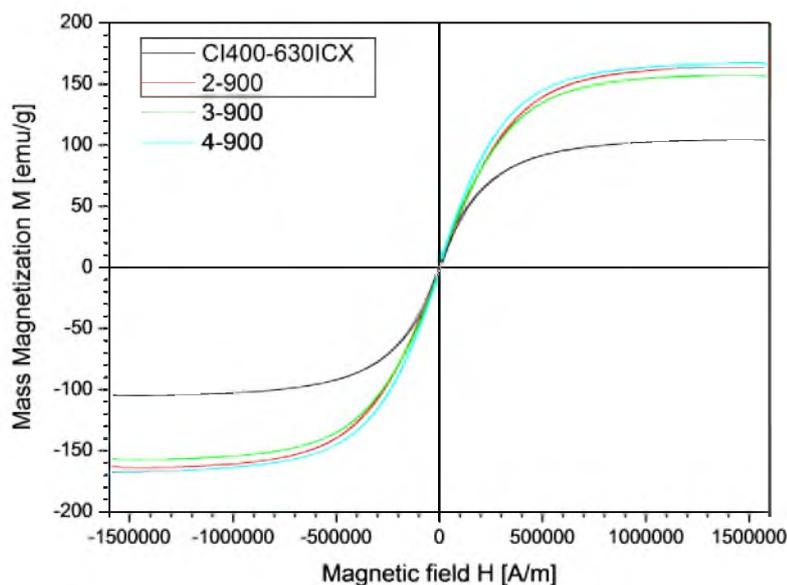


Рисунок 1 – Петли гистерезиса для порошков на основе колотой чугуновой дроби фракции 400-630, подвергнутых диффузионному борированию при различных режимах

Все приведенные петли магнитного гистерезиса для порошков с различным содержанием бора характеризуются очень малой площадью, что свидетельствует о том, что все исследованные материалы магнитомягкие и потери на намагничивание и перемагничивание их минимальны, а сами материалы при этом не будут нагреваться. При ближайшем рассмотрении заметно, что коэрцитивное поле исходного порошка, не подвергнутого диффузионному борированию, больше, в то время, как магнитный момент насыщения (равный 104) для этого материала примерно в 1,5 раза меньше, чем у борированных порошков ($\max=167$, $\min=157$). Такое различие, очевидно, вызвано отличием структуры порошков: исходный порошок обладает структурой белого чугуна, в состав которого входит цементит, являющийся слабомагнитным при комнатных температурах; борированный порошок вследствие химико-термической обработки, по режиму похожей на графитизирующий отжиг, содержит графит. Графит известен, как диамагнетик – вещество, намагничивающееся против направления внешнего магнитного поля. Поэтому, магнитный момент насыщения материалов, содержащих графит, увеличивается. Кроме того, известно, что боридные фазы железа FeB и Fe_2B , имеют худшие магнитные свойства в сравнении с твердыми растворами железа.

Исследования магнитных свойств порошков с различной толщиной боридной оболочки позволяют сделать вывод, что критическим показателем, определяющим возможность применения диффузионно-борированных порошков для метода магнитно-абразивной обработки является толщина боридного слоя, выдерживающая максимальное количество циклов, наименее подверженная хрупкому разрушению и в результате обеспечивающая заданную шероховатость поверхности.

Технологические свойства диффузионно-борированных порошков на основе колотой чугуновой дроби

В исследованиях использовали колотую чугуновую дробь с размером частиц 0,063...0,080 мм, 0,200...0,315 мм и 0,315...0,400 мм, борированную в порошковой среде карбида бора (рис.2).

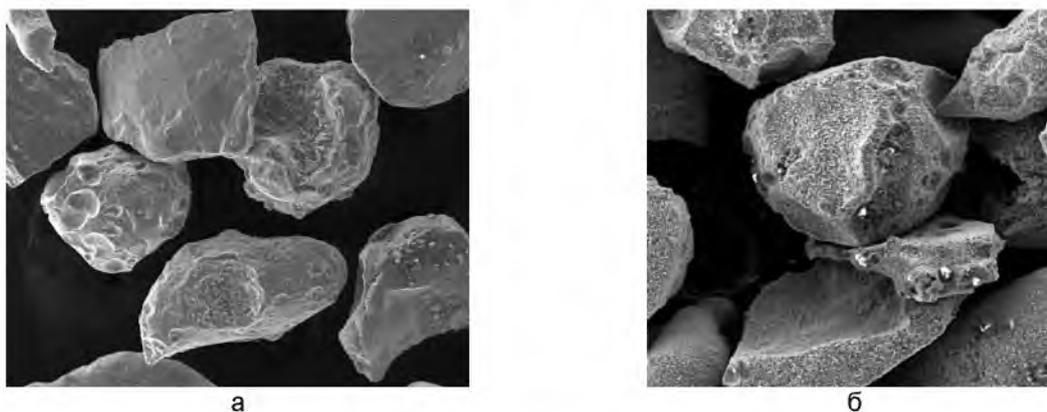


Рисунок 2 – Морфология частиц: а – исходный порошок; б – после диффузионного борирования

Диффузионное борирование производилось согласно рекомендациям, изложенным в [11].

Магнитно-абразивную обработку образцов цилиндрической формы из стали 45 ГОСТ 1050-88, подвергнутой закалке и высокому отпуску, производили на лабораторной установке при одинаковых технологических режимах с использованием порошка, показавшего наилучшие результаты по производительности и шероховатости обработанной поверхности, металлизированного железом электрокорунда и порошка из борированных отходов чугунной дробы. Время одного цикла обработки – 30 секунд. Для определения влияния порошка на производительность процесса магнитно-абразивной обработки использовался гравиметрический метод по потере массы. Взвешивание производили на аналитических весах марки ВСЛ-200/0,1А с точностью до $1 \cdot 10^{-7}$ кг. Перед взвешиванием образцы промывались в ацетоне (ГОСТ 2603-71). Шероховатость обработанной поверхности определялась на профилометре Сейтроник ПШ8-4С. Все полученные результаты подвергали обработке с использованием аппарата математической статистики. Результаты проведенных испытаний борированных порошкови известным композиционным материалов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты проведенных испытаний борированного порошка и металлизированного электрокорунда

N п/п	Характеристика ферромагнитного абразивного материала			Технологические характеристики порошка, процесса шлифования и обработанной поверхности		
	Ферромагнитный абразивный материал	Содержание бора в материале, мас. %	Диапазон размеров частиц порошка, мм	Производительность, мг/цикл	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Стойкость порошка, циклов
Металлизированный порошок						
1	Электрокорунд, металлизированный железом	-	0,200...0,315	158±4	0,34±0,03	82±5
2	Электрокорунд, металлизированный железом	-	0,315...0,400	172±4	0,50±0,04	87±6
Борированный порошок						
3	Борированный порошок	4,8±0,2	0,200...0,315	212±5	0,32±0,03	110±8
4	Борированный порошок	4,8±0,2	0,315...0,400	245±5	0,50±0,04	118±8
5	Борированный порошок	4,4±0,2	0,063...0,080	162±4	0,09±0,01	84±5

Из данных, приведенных в таблице, видно, что производительность и стойкость борированного порошка выше по сравнению с металлизированным электрокорундом. Это обусловлено высокими магнитными свойствами диффузионно-борированной колотой чугуной дроби и высокой твердостью всех частиц порошка, так как, в отличие от прототипа, абразивная составляющая, представляющая собой боридный слой вокруг ферромагнитного ядра, имеется на каждой частице ферромагнитного порошка. При этом высокая производительность процесса обработки не снижает качество обработанной поверхности, что подтверждают данные, приведенные в таблице. Шероховатость обработанных поверхностей с использованием порошков металлизированного электрокорунда и диффузионно-борированного материала одинакова для порошков соответствующей фракции. Кроме того, возможность изготовления порошков более мелкой фракции (0,063...0,08 мм) позволяет получить поверхности с более низкой шероховатостью (до Ra 0,09 мкм) по сравнению с порошками прототипа, для которых имеется технологическое ограничение по размеру частиц.

Таким образом, диффузионно-борированный ферромагнитный абразивный порошок на основе колотой чугуной дроби обладает более высокой производительностью и стойкостью, чем известные аналогичные материалы, а также обладает более высокой полирующей способностью, более технологичен в изготовлении и использовании. При этом порошок выгодно отличается более низкой стоимостью.

Результаты исследований показали, что разработанные порошки из диффузионно-борированных отходов производства чугуной дроби успешно могут заменять дорогостоящие промышленно выпускаемые аналоги, в том числе и импортные. При аналогичной дисперсности исследуемые материалы (созданный борированный порошок и металлизированный железом электрокорунд) обеспечивают аналогичную шероховатость поверхности, однако предложенный новый материал выгодно отличается большей стойкостью и производительностью.

Изменение морфологии и стойкость диффузионно-борированных ферромагнитных абразивных порошков на основе колотой чугуной дроби

Стойкость ферромагнитного абразивного материала, то есть способность сохранять способность к микрорезанию в течение цикла обработки, является одним из важнейших параметров, характеризующих их технологические свойства. Ввиду того, что большинство спеченных ферромагнитных абразивных материалов представляет собой ядро, имеющее абразивные включения, разрушение частиц порошка приводит к тому, что у частиц появляются поверхности, лишённые абразивных включений, и процесс обработки резко замедляется. Поэтому данные о стойкости ферромагнитного абразивного порошка очень важны для своевременной замены в зоне обработки.

Для определения стойкости диффузионно-борированного абразивного порошка были проведены исследования морфологии порошков после магнитно-абразивной обработки при различных условиях с применением сканирующего электронного микроскопа. В работе изучалась морфология и структура частиц борированной чугуной дроби до и после использования порошка для магнитно-абразивной обработки поверхности с целью изучения и описания механизма образования трещин и измельчения частиц порошка в процессе эксплуатации.

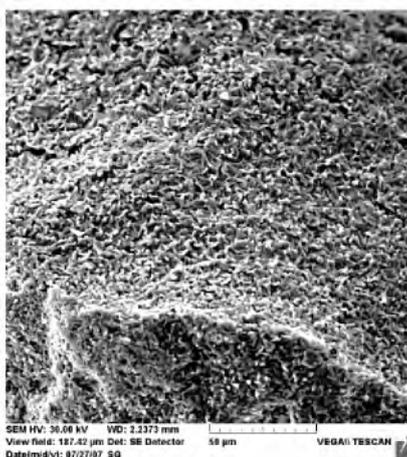
В качестве ферромагнитных абразивных материалов использовали диффузионно-борированные порошки на основе колотой чугуной дроби (фракция 400–800 мкм, подвергнутые диффузионному борированию с среде карбида бора в течение 2 часов при температуре 900°C) с толщиной боридного слоя 20–30 мкм.

Данный порошок-инструмент применяли для магнитно-абразивной обработки образцов цилиндрической формы из стали 45 ГОСТ 1050-88, подвергнутой закалке и высокому отпуску, при различных режимах, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы магнитно-абразивной обработки

№ образца	Время магнитно-абразивной обработки, мин	Частота вращения обрабатываемой детали, мин ⁻¹
1	5	630
2	15	500
3	15	630
4	30	400

Морфология исходного порошка приведена на рисунке 3,а. Данный порошок имеет угловатую осколочную форму и игольчатую поверхность, которая обусловлена химико-термической обработкой – иглы боридов растут как внутрь частиц, так и наружу, придавая исходной поверхности частиц (рис.3,б) большую шероховатость.



а



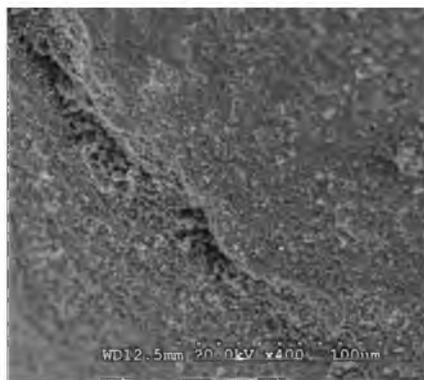
б

Рисунок 3 – Морфология частиц колотой чугуновой дроби: а – подвергнутой диффузионному борированию; б – исходной

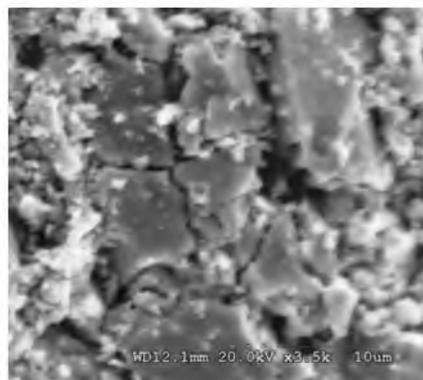
После применения указанных материалов в качестве порошка-инструмента для магнитно-абразивной обработки вследствие соударения частиц с обрабатываемой поверхностью и между собой наблюдается следующее:

- на начальных стадиях наблюдается разрушение микроразмерных игл боридов, вступающих на поверхности частиц (рис.4,а). Осколки боридов железа скапливаются во впадинах на поверхности частиц и при дальнейшей обработке выполняют полирующую функцию при условии соприкосновения с обрабатываемой поверхностью;

- следующая стадия – появление на поверхности частиц микротрещин (рис.4,б,в), которые постепенно растут (рис.4,г), причем росту трещин способствует пористость боридного слоя. Кроме этого, их появление обусловлено высокой твердостью и хрупкостью боридов железа;



а



б

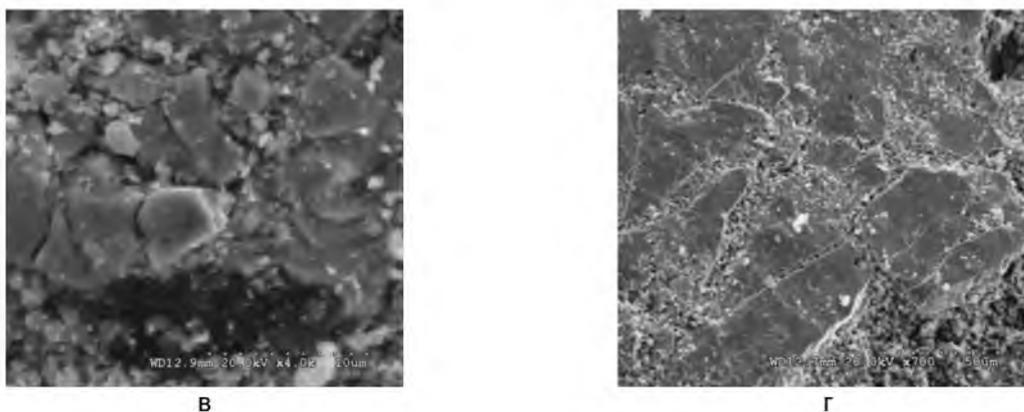


Рисунок 4 – Изменение морфологии частиц диффузионно-борированной колотой чугунной дробы в процессе магнитно-абразивной обработки на начальных стадиях

Увеличение времени использования рассматриваемого порошка (более 10 мин основного времени при частоте вращения 630 об/мин) приводит к следующим стадиям изменения морфологии частиц порошка:

- выкрашивание микроигл боридов на поверхности частиц приводит к тому, что на поверхность выходят микропоры, находящиеся в боридном слое (рис.5,а);
- следующая стадия – выкрашивание секторов поверхности частиц (рис.5,б) вследствие соединения образовавшихся на начальных стадиях трещин с порами в боридном слое. На поверхности образца заметны измельченные иглы боридов, сколотые на начальных стадиях;

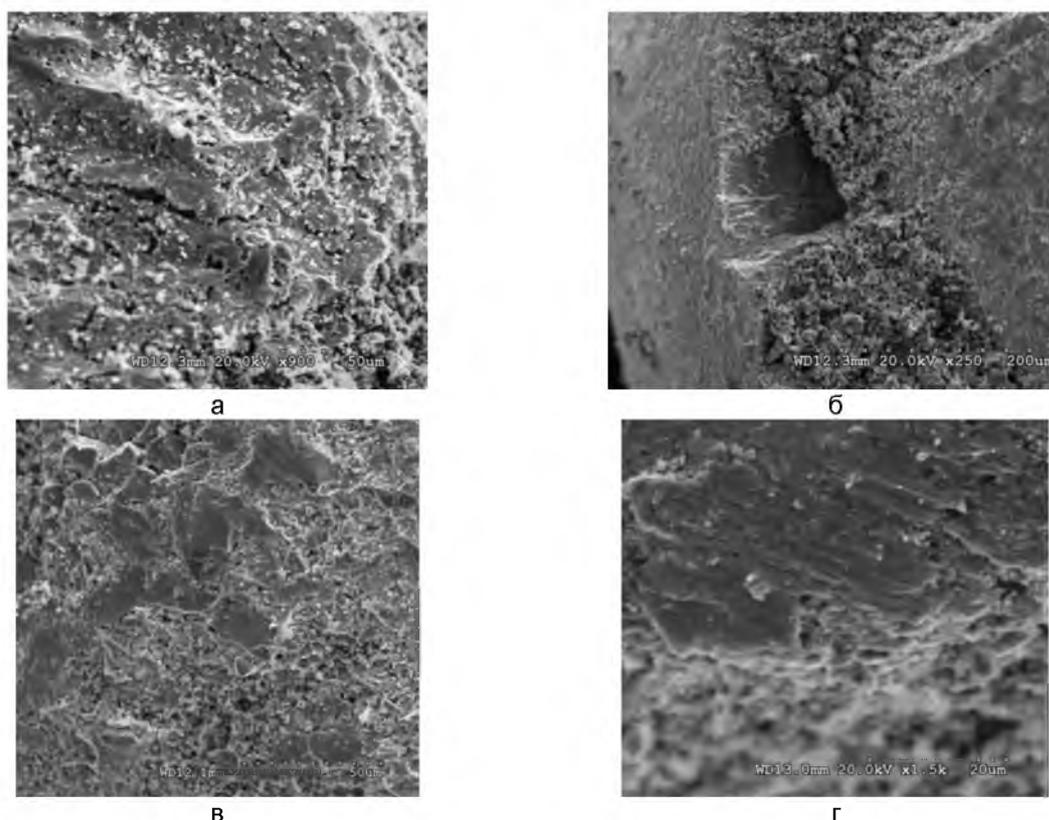


Рисунок 5 – Изменение морфологии частиц диффузионно-борированной колотой чугунной дробы в процессе магнитно-абразивной обработки на последующих стадиях разрушения

- при соударении частиц, поверхность которых характеризуется высокой твердостью, их выступающие части подвергаются скалыванию и сдвиговым деформациям, о чем свидетельствует морфология частиц образца №2 (рис.5,в) и №3

(рис.5,г) – четко прослеживаемые царапины вдоль сдвиговых деформаций особенно четко заметны на рисунке 5,г;

- дополнительным катализатором при образовании и разрастании трещин с поверхности вглубь частиц при магнитно-абразивной обработке являются графитные включения, локализующиеся в подборидном слое (рис.5,а) – на фотографии микрошлифа четко заметны пористый боридный слой и трещины на месте графитных включений в ядре частицы;

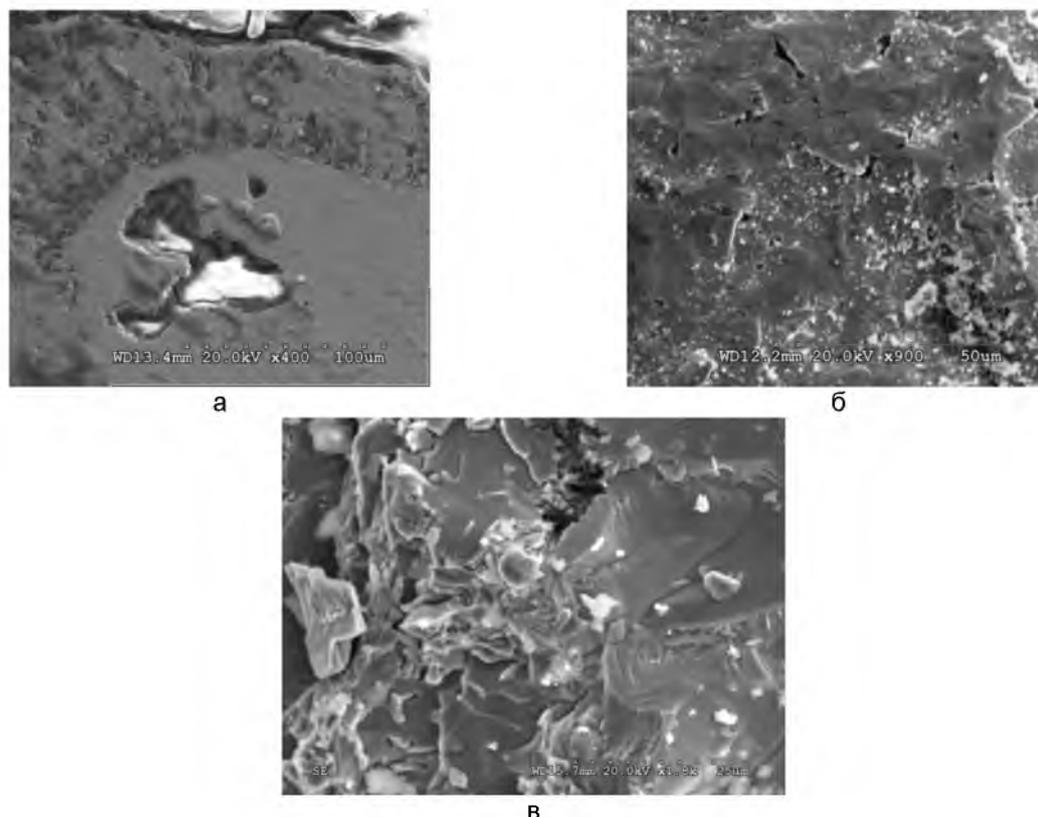


Рисунок 6 – Стадии деформирования поверхности частиц диффузионно-борированной колотой чугуновой дроби в процессе магнитно-абразивной обработки

Интересный эффект наблюдается если использовать в качестве ферромагнитного абразивного материала колотую чугуновую дробь, подвергнутую диффузионному борированию в течение 5 часов при температуре 900 °С. Как известно из предыдущих исследований, при таких режимах диффузионного насыщения бором для частиц 500...630 мкм происходит сквозное борирование, то есть вся частица состоит только из двух фаз – фаз FeB и Fe₂B. При этом в частицах наблюдается эффект графитизации, когда углерод, находящийся в твердом растворе, проявляется в виде графитных включений. Эти включения, являясь своеобразными концентраторами напряжений, способствуют ускоренному разрушению частиц ферромагнитного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки. Частицы порошка, взаимодействуя друг с другом и с обрабатываемой деталью, испытывают многократные циклические контактные нагрузки, превышающие предел их контактной выносливости. Трещины, зарождаясь как на поверхности частицы, состоящей из хрупкой фазы Fe₂B, так и на месте графитных включений, приводят к быстрому разрушению частицы. Исследования ферромагнитного абразивного материала из колотой чугуновой дроби, подвергнутой диффузионному борированию в течение 5 часов при температуре 900 °С, показали, что разрушение его частиц происходит после 5 минут обработки детали диаметром 45 мм при частоте вращения 630 об/мин, в то время как разрушение борированных абразивных материалов с толщиной боридного слоя 20...30 мкм начиналось только после 15 минут работ при тех же режимах. Влияние толщины боридного слоя на стойкость порошка приведено на рисунке 7.

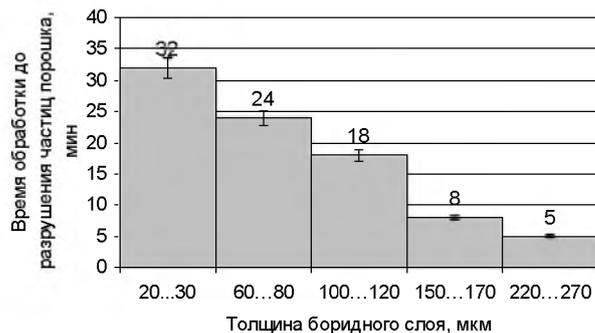


Рисунок 7 – Время магнитно-абразивной обработки диффузионно-борированными порошками на основе колотой чугунной дроби фракции 500...630 мкм с различной толщиной боридного слоя

В данных исследованиях в качестве количественного критерия разрушения порошка принимали уменьшение не менее 80% по массе его фракционного состава. Как видно из графика на рисунке 7, увеличение продолжительности диффузионного борирования, а, следовательно, и увеличение толщины боридного слоя до 150...170 мкм для частиц фракции 500...630 мкм, близкому к сквозному борированию, приводит к резкому снижению стойкости порошка. Однако, если для спеченных композиционных материалов, состоящих из железного ядра и зерен оксидов, это означает практически полную потерю режущих свойств, для борированных ферромагнитных абразивных материалов разрушение порошка означает переход его в другой фракционный состав. На рисунке 8 показано изменение фракционного состава порошка колотой чугунной дроби исходной фракции 500...630 мкм, подвергнутого сквозному диффузионному насыщению бором, а на рисунке 9 показано изменение производительности обработки этого порошка от времени его работы.

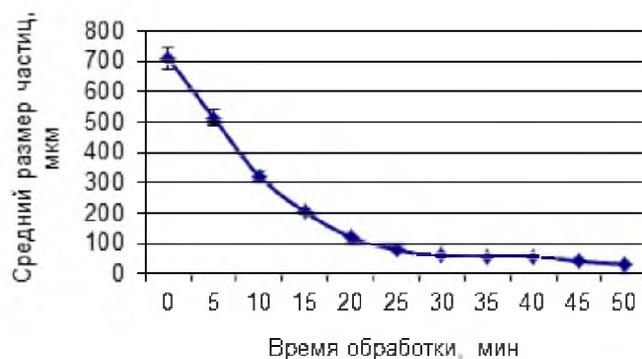


Рисунок 8 – Изменение фракционного состава диффузионно-борированного порошка на основе колотой чугунной дроби фракции 500...630 мкм от времени магнитно-абразивной обработки

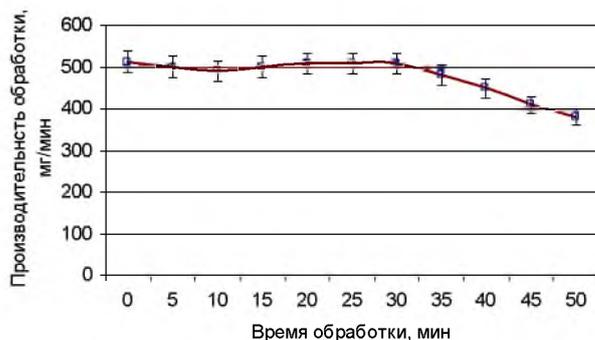


Рисунок 9 – Изменение производительности обработки диффузионно-борированным порошком на основе колотой чугунной дроби фракции 500...630 мкм от времени магнитно-абразивной обработки

Как видно из рисунка 8, разрушение порошка происходит достаточно быстро, и борированный ферромагнитный абразивный порошок фракции 650...720 мкм (увеличение размера частиц порошка после борирования происходит за счет меньшей удельной плотности боридных фаз) за 5 минут работы разрушается до фракции 500...630 мкм, и к концу исследования, при 50 минутах работы фракция порошка составляла 25...31,5 мкм. При этом порошковый материал отчетливо менял свой цвет: из светло-серого становился черным, проявляя графитный блеск. Очевидно, что при разрушении частиц порошка, углерод, находящийся в виде графитных включений, высвобождается и перемешивается с магнитно-абразивным порошком уже как самостоятельный элемент, а не как элемент частиц, придавая порошку черный цвет. Часть графита просыпается из рабочего зазора, более мелкие частицы удерживаются на частицах порошка за счет электростатических сил.

Весьма необычно проявляет себя производительность данного порошкового материала. Если для традиционных спеченных материалов разрушение порошка означает практически полную потерю режущих способностей, то для исследуемых диффузионно-борированных порошковых материалов производительность снижается только в начале обработки, когда происходит разрушение частиц, и, соответственно, уменьшение глубины и длины царапин при микрорезании. Однако после 10...30 минут работы производительность возрастает до 505...508 мг/мин и остается на этом уровне до 35 минут обработки, несмотря на продолжающееся разрушение порошка и уменьшение его фракционного состава. Объясняется это тем, что у данных порошковых материалов режущей частью является вся частица, а не абразивное зерно, как у спеченных материалов. Поэтому частица, разрушаясь, создает новые режущие кромки, участвующие в микрорезании. Увеличение производительности обусловлено повышением магнитных свойств порошка за счет удаления из него немагнитного графита, и, как следствие, увеличением жесткости инструмента. Снижение производительности после 35 минут обработки объясняется как постепенным затуплением режущих кромок и уменьшением способности частиц порошка к микрорезанию, так и уменьшением шероховатости обрабатываемой поверхности и, соответственно, уменьшением площади контакта порошка с поверхностью.

Таким образом, диффузионно-борированные порошки на основе колотой чугуной дроби при сквозном борировании способны измельчаться в процессе резания, не снижая своей производительности, что позволяет получать мелкодисперсные ферромагнитные абразивные материалы без применения операции измельчения, вызывающей значительные трудности при получении порошков фракции менее 25 мкм. Однако эффект графитизации не позволяет применять данные порошки для обработки труднодоступных поверхностей, так как такие порошки загрязняют обрабатываемую поверхность графитом. Удаление графита с наружных поверхностей не вызывает трудности, однако может вызвать проблемы при финишной обработке отверстий малого диаметра, а также обработке пористых материалов. Поэтому для широкого универсального применения рекомендуется использовать порошковые материалы, имеющие толщину боридного слоя от 10 до 30 мкм в зависимости от размера исходных частиц.

Достигаемая шероховатость (полирующая способность) ферромагнитных абразивных материалов также является важной характеристикой, определяющей качество такого материала. Для оценки достигаемой шероховатости поверхности, обработанной диффузионно-борированными порошковыми материалами, проводились сравнительные исследования по влиянию фракционного состава, времени обработки на шероховатость обработанной поверхности. В качестве порошка-эталоны был принят наиболее распространенный в магнитно-абразивном полировании порошок Fe-TiC фракционного состава 0,100...0,125 мкм. Результаты исследований приведены на рисунке 10.

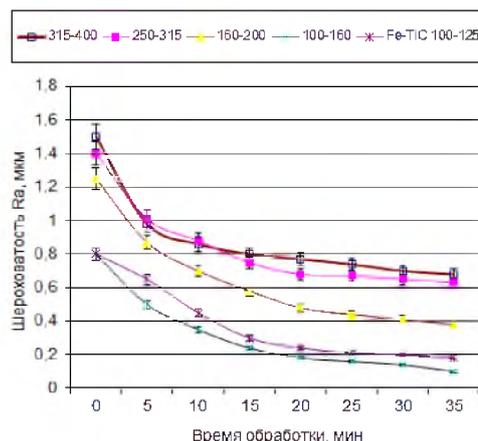


Рисунок 10 – Изменение шероховатости поверхности от времени магнитно-абразивной обработки диффузионно-борированным порошком на основе колотой чугунной дробы фракциями 315...400 мкм, 250...315 мкм, 160...200 мкм, 100...160 мкм, порошком Fe-TiC фракции 100...125 мкм

Как видно из рисунка 10, диффузионно-борированные порошки крупных фракций обеспечивают снижение шероховатости с Ra 1,4...1,25 мкм до Ra 0,40...0,63 мкм, что соответствует шероховатости при обработке шлифовальными на жесткой связке. Порошок мелкого фракционного состава 100...163 мкм обеспечивает достижения шероховатости Ra 0,10...0,11 мкм, соответствующей полированной поверхности. Схожую шероховатость обработанной поверхности обеспечивает порошок Fe-TiC фракции 100...125 мкм, обладающий меньшей производительностью. Для достижения шероховатости Ra 0,10...0,11 мкм длительность обработки в тех же условиях должна составлять не менее 45 мин.

Заключение

Технология магнитно-абразивной обработки наиболее целесообразно применима при обработке сложнопрофильных наружных поверхностей, труднодоступных внутренних поверхностей, отверстий малого диаметра, эффективного снятия заусенцев, тонкостенных изделий, где неприменим абразивный инструмент на жесткой связке.

Одним из основных факторов, ограничивающих широкое применение технологии магнитно-абразивной обработки, является отсутствие гаммы магнитно-абразивных материалов, сочетающих в себе взаимоисключающие свойства: высокую твердость, присущую неметаллам, и высокие магнитные свойства.

Диффузионно-борированные порошковые материалы на основе колотой чугунной дробы обеспечивают комбинацию высокой твердости поверхности частицы и высокие магнитные свойства, что позволяет применить данные материалы в технологии магнитно-абразивной обработки. Сравнительные испытания показали большую производительность порошка, чем у известных спеченных или металлизированных ферромагнитных абразивных материалов, а также низкую шероховатость обработанной поверхности.

Установлены причины и стадии разрушения частиц диффузионно-борированных порошковых материалов на основе колотой чугунной дробы, показано влияние толщины боридной фазы на характер разрушения частиц.

Разрушение диффузионно-борированных порошковых материалов на основе колотой чугунной дробы не приводит к снижению их производительности, что наблюдается у спеченных абразивных материалов, а также позволяет получить мелкодисперсные порошки без операции измельчения.

Диффузионно-борированные порошковые материалы на основе колотой чугунной дробы фракции 100...160 мкм обеспечивают шероховатость обработанной поверхности Ra 0,10...0,11 мкм, что соответствует наиболее распространенным порошкам Fe-TiC, обладающих высокой полирующей способностью, но меньшей производительностью.

Список литературы:

1. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн. Наука и техника, 1981. – 328 с.
2. Shinmura T. and Yamaguchi H.: A New Process for Internal Finishing of Nonferromagnetic Vessels by the Application of Magnetic Field Assisted Machining, J. Jpn. Soc. Abrasive Technology, Vol. 38, No. 6 (1994), pp. 320-326.
3. Lin C.T., Yang L.D., and Chow H.M.,(2007), "Study of Magnetic Abrasive Finishing In FreeForm Surface Operations Using The Taguchi Method", International Journal of Advance Manufacturing Technology , vol. 12, No 2, 2007, pp 122–130.
4. Mori T., Hirota K., and Kawashima Y.,(2003), "Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism", Journal of Materials Processing Technology, 143–144, pp 682–686.
5. Yamaguchi H., Yumoto K., Shinmura T., and Okazaki T.: Study of Finishing of Wafers by Magnetic Field-assisted Finishing, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 3, No. 1 (2009), pp. 35-46.
6. Yamaguchi H., Shinmura T., and Takenaga M.: Development of a New Precision Internal Machining Process Using an Alternating Magnetic Field, Precision Engineering, Vol. 27, No. 1 (2003), pp. 51-58.
7. Ящерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. Алмазно-абразивная обработка изделий в магнитном поле.– Мн.: Наука и техника, 1988. – 272 с.
8. Hanada K. and Yamaguchi H.: Development of Spherical Iron-based Composite Powder with Carried Alumina Abrasive Grains by Plasma Spray, Advanced Materials Research, Vol. 75 (2009), pp.43-46.
9. Hanada K., Yamaguchi H., and Zhou H.: New Spherical Magnetic Abrasives with Carried Diamond for Internal Finishing of Capillary Tubes, Diamond and Related Materials, Vol. 17 (2008), pp.1434-1437.
10. Sato T., Yamaguchi H., Shinmura T., and Okazaki T.: Study of Internal Finishing Process for Capillary using Magneto-rheological Fluid, J. Jpn. Soc. Prec. Eng, Vol. 75, No. 5 (2009), pp. 612-616.
11. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
12. Ферромагнитный абразивный материал. Патент РБ 16981. МПК8, С9К3/14, В24Д3/34, С23С8/68. Пантелеенко Ф. И.; Петришин Г. В., Быстренков В. М., Демиденко Е. Н., Пантелеенко А. Ф. Оpubл. 30.04.2013// Аф. Бюл./ Нац. Цэнтр інтэлектуал. Уласнасці – 2013 №2. С.104-105.