

PACS numbers: 61.43.Gt, 61.72.Mm, 62.20.Qp, 62.23.St, 68.35.Np, 81.05.uj, 81.07.Wx

## **Металлические микро- и наночастицы в процессах разделения порошков сверхтвёрдых материалов**

Н. В. Новиков, Г. Д. Ильницкая, Г. П. Богатырева, Г. Ф. Невструев,  
О. В. Лещенко, И. Н. Зайцева

*Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,  
ул. Автозаводская, 2,  
04074 Киев, Украина*

Нано- и микрочастицы металла используются при разделении кристаллов сверхтвёрдых материалов (СТМ) по степени дефектности поверхности. Дефектность поверхности тесно связана с прочностью кристаллов. Исследованиями показано, что сила адгезионного контакта при взаимодействии твердых частиц с поверхностью порошков СТМ может достигать больших значений. Явление адгезии использовано при разделении порошков СТМ по степени дефектности их поверхности и ряду других свойств. Для этого на поверхности зерен СТМ производится адгезионное закрепление отдельных микро- и наночастиц порошка с определенными ярко выраженными свойствами (магнитными, электрическими или другими). В результате зерна СТМ приобретают свойства частиц порошка (ферромагнетика), закрепившихся на поверхности зерен. Приобретенные новые высококонтрастные свойства обеспечивают условия селективного разделения зерен порошков СТМ в силовом поле соответственно свойствам частиц ферромагнетика, закрепившихся на поверхности зерен, на ряд порошков, различающихся между собой по степени дефектности поверхности зерен. В данной статье приводятся результаты исследований при разделении шлифпорошков СТМ с применением нано- и микрочастиц ферромагнитных порошков.

Нано- та мікрочастинки металу використовуються при розподілі кристалів надтвердих матеріалів (НТМ) за ступенем дефектності поверхні. Дефектність поверхні тісно пов'язана з міцністю кристалів. Дослідження показали, що сила адгезійного контакту при взаємодії твердих частинок з поверхнею порошків НТМ може досягати великих значень. Явище адгезії використано при розділенні порошків НТМ за ступенем дефектності їх поверхні та низки інших властивостей. Для цього на поверхні зерен НТМ виконується адгезійне закріплення окремих мікро- та наночастинок порошку металу з яскраво вираженими визначеними властивостями (магнетними, електричними тощо). В результаті зерна НТМ набувають властивості частинок по-

рошку (ферромагнетика), що закріпилися на поверхні зерен. Набуті нові висококонтрастні властивості забезпечують умови селективного розподілу зерен порошків НТМ у силовому полі відповідно до властивостей частинок ферромагнетика, що закріпилися на поверхні зерен, на ряд порошків, що відрізняються між собою за ступенем дефектності поверхні зерен. В цій статті представлено результати досліджень при розподілі шліфпорошків НТМ із застосуванням нано- та мікрочастинок ферромагнетних порошків.

Metal nano- and microparticles are used for separation of superhard material (SHM) crystals by degree of surface defectiveness. The surface defectiveness is closely related to crystal strength. Adhesive contact intensity in interaction of solid particles with surface of SHM powders can reach high values. Adhesion effect is used for the separation of SHM powders by degree of surface defectiveness and some other properties. For this goal, some micro- and nanoparticles of metal powder with certain pronounced properties (magnetic, electric, etc.) are fixed by adhesion to the surface of SHM grains. As a result, SHM grains get properties of ferromagnetic powder particles attached to the grain surfaces. New high-contrast properties provide conditions for selective separation of SHM powder grains in force field according to properties of ferromagnetic powder particles attached to grain surface into a number of powders differing in degree of grain-surface defectiveness. The results of studies of SHM grind-powder separation process with use of nano- and microparticles of ferromagnetic powders are presented in a given article.

**Ключевые слова:** дефектность поверхности, адгезионное закрепление, алмаз, кубический нитрид бора, прочность, однородность шлифпорошка.

*(Получено 20 декабря 2007 г.; после доработки — 30 ноября 2009 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Изготовление высокопроизводительного инструмента основывается на использовании высококачественных шлифпорошков сверхтвердых материалов (СТМ) различной зернистости и прочности. Как известно, при синтезе, как синтетического алмаза, так и кубического нитрида бора (кубонита) в одном реакционном объеме формируются кристаллы различного размера и уровня дефектности, а, следовательно, прочности [1, 2]. Связующим звеном между синтезом СТМ и их использованием в инструменте являются технологии формирования алмазных порошков с узким диапазоном зернистостей и различной прочности с применением процессов классификации и сортировки. Сложность сортировки шлифпорошков СТМ по характеристикам прочности заключается в разделении зерен алмаза по их дефектности, величину которой не просто оценивать. Наибольшее распространение на предприятиях Украины и зарубежных фирмах получили способы сортировки по форме зерен и по количеству внутрикристаллических включений. Разработаны способы сортировки ал-

мазов по дефектности поверхности флотацией и трибомагнитной сепарацией, но эти макропроцессы недостаточно эффективны [3–6].

Синтез прочных и особо прочных кристаллов СТМ, развитие их методов сортировки и классификации расширяют области их использования и возможности изготовления из них различных видов инструмента. Для развития этого направления необходимо повысить качество шлифпорошков СТМ, которое может быть обеспечено только применением более совершенных методов сортировки СТМ по дефектности их поверхности и соответствующих физико-механических характеристик.

В связи с этим актуальным представляется разработка новых методов сортировки на основе создания контролируемых высококонтрастных свойств порошков СТМ, исходя из общей дефектности поверхности их зерен. Новые методы могут обеспечить высокоселективное разделение порошков на ряд фракций, отличающихся однородностью состава и свойств.

Поверхность твердого тела является одним из основных дефектов трехмерной структуры. Теоретически и экспериментально установлена зависимость прочностных характеристик кристаллов твердого тела от уровня дефектности их поверхности. Наличие дефектов неизбежно приводит к энергетической неоднородности поверхности. Исходя из этого, состояние поверхности лучше всего описывать распределением мест по энергиям, причем каждый минимум рассматривать как адсорбированное место, на котором можно закреплять атом, молекулу или твердую микрочастицу. По количеству закрепившихся элементов можно оценивать характеристику поверхности.

Развитие науки о дальнедействующих поверхностных силах, разработанное научной школой Б. В. Дерягина, позволило расширить представления об адгезии твердых частиц к поверхности разной степени шероховатости [7–9]. Исследованиями показано, что сила адгезионного контакта при взаимодействии твердых частиц с поверхностью порошков сверхтвердых материалов (СТМ) может достигать больших значений. Явление адгезии авторами использовано при разделении порошков СТМ по степени дефектности их поверхности и ряду других свойств [10, 11].

Для этого на поверхности зерен СТМ производится адгезионное закрепление отдельных микро- и наночастиц металлического порошка с ярко выраженными определенными свойствами (магнитными, электрическими или другими). В итоге у зерен СТМ возникают приобретенные свойства частиц порошка, закрепившихся на поверхности зерен СТМ. В результате новые высококонтрастные приобретенные свойства обеспечивают условия селективного разделения зерен порошков СТМ в силовом поле, соответствующем свойствам частиц порошка закрепившихся на поверхности зерен

СТМ, на ряд порошков, различающиеся между собой по степени дефектности их поверхности.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящая работа выполнена с целью изучения свойств металлических нано- и микропорошков, позволяющих обеспечить высококонтрастные свойства шлифпорошков СТМ для их разделения по дефектности поверхности зерен. На примере использования ферромагнитных порошков показана возможность создания новых более сильных магнитных свойств у зерен СТМ и их последующее разделение в магнитном поле различной напряженности.

В работе исследованы ферромагнитные порошки с высокими магнитными свойствами: гамма-оксид железа, карбонильное железо, железный порошок марки ПЖ2-4М и никелевый порошок марки ПНЭ-1. Кроме магнитных свойств порошков с помощью рентгеноспектрального и рентгеновского электронно-микроскопического анализов изучали их фракционный состав по крупности, а так же размеры и форму отдельных микрочастиц, закрепившихся на поверхности зерен СТМ. Исследовались свойства шлифпорошков СТМ, полученных после контактного взаимодействия с ферромагнитным порошком. Оценивалась масса частиц ферромагнитного порошка, закрепившихся на поверхности зерен и величина приобретенной магнитной восприимчивости шлифпорошков СТМ. После разделения в магнитном поле зерен шлифпорошков СТМ было получено несколько групп порошков, различающихся между собой по дефектности их поверхности.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Создание сильной контрастности по магнитным свойствам у зерен шлифпорошков СТМ может быть обеспечено при условии, что восприимчивость ферромагнитного порошка на 3–4 порядка превышает магнитную восприимчивость алмазного порошка. Для обеспечения прочного адгезионного взаимодействия ферромагнитных частиц с поверхностью зерен алмаза необходимо, чтобы ферромагнитный порошок содержал в достаточном количестве частицы, размеры которых соизмеримы с размерами дефектов на поверхности алмазных кристаллических частиц, т.е. должны быть на 1–3 порядка меньше размера зерен алмазного порошка. Обязательным требованием к ферромагнитным порошкам является отсутствие у них остаточной намагниченности, которая приводит к комкованию порошка, неконтролируемому перемещению ферромагнитных частиц по поверхности зерна шлифпорошка СТМ и ослаблению контактного взаимодействия. Отсутствие остаточной намагниченности легко проверяется

по состоянию ферромагнитного порошка (наличие комкования), прошедшего через зону магнитного поля.

Принимая во внимание изложенные выше требования, были исследованы четыре серийно выпускаемых ферромагнитных порошка (табл. 1). Содержание основного элемента в порошках приведено из соответствующих Технических условий. С точки зрения их практического использования измерены средний размер частиц и удельная магнитная восприимчивость, которая для всех порошков на четыре порядка ( $10^{-4}$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ) выше магнитной восприимчивости шлифпорошков СТМ ( $10^{-8}$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ). Высокая магнитная восприимчивость порошков связана с преобладающим содержанием (более 97,6%) основного ферромагнитного элемента. Порошки различаются по среднему диаметру частиц.

Однако усредненные показатели не дают информации о пригодности их в качестве магнитных носителей. Поэтому были проведены более детальные исследования микрогеометрических характеристик ферромагнитных частиц.

На рисунке 1 показаны полученные электронной микроскопией

ТАБЛИЦА 1. Характеристика ферромагнитных порошков.

Наименование порошка	Содержание основного элемента, %	Средний размер частиц, $d_{\text{ср}}$ , мкм	Удельная магнитная восприимчивость, $\chi$ , $10^{-4}$ , $\text{м}^3/\text{кг}$
Карбонильное железо ТУ 6-09-3000-78	Fe — 99,5	6,4	3,50
Гамма-оксид железа марки ПММ-1 ТУ 6-17-1192-93	Fe — 97,6	0,2–0,4	1,80
Никелевый порошок марки ПНЭ-1 ГОСТ 9722-97	Ni — 99,5	15,3	0,85
Порошок железный марки ПЖ2-4М ГОСТ 9849-86	Fe — 98,8	15,6	2,90

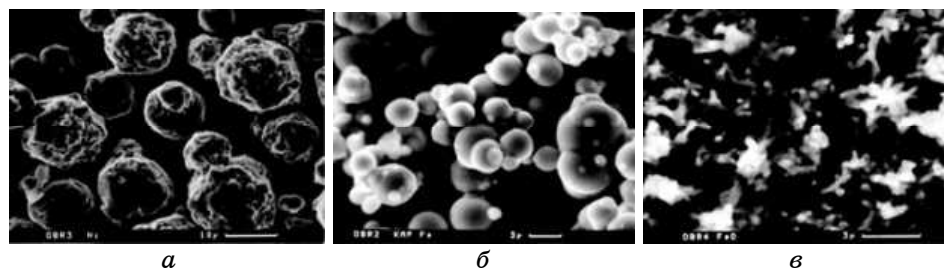


Рис. 1. Фотографии частиц порошка никеля (а), карбонильного железа (б) и гамма-оксид железа (в).

фотографии частиц порошка никеля (*a*), карбонильного железа (*b*) и гамма-оксид железа (*в*). Сравнение с реперными отрезками позволяет отметить, что частицы никеля имеют размеры порядка 10 мкм, карбонильного железа — на уровне 1–3 мкм. А частицы гамма-оксид железа имеют размеры менее 1 мкм. Наблюдается резкое различие в форме частиц и развитости их поверхности. Порошок никеля состоит из шарообразных частиц с развитой шероховатой поверхностью (*a*), карбонильное железо представлено сферическими частицами с гладкой поверхностью. Резко отличается порошок гамма-оксид железа, состоящий в основном из игольчатых сростков малых размеров, из которых в процессе перемешивания с шлифпорошками СТМ могут образовываться частицы меньших размеров.

Было проведено исследование распределения частиц по размерам для исследуемых ферромагнитных порошков на гранулометре. На основании результатов исследования магнитных свойств и зернового состава порошков установлено следующее.

Все исследованные ферромагнитные порошки практически не имеют остаточной намагниченности и характеризуются высокой магнитной восприимчивостью —  $(0,8-3,5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Однако порошки различаются по среднему диаметру частиц. Зерновому составу, форме частиц и шероховатости их поверхности. Порошок никеля, состоящий из шарообразных частиц с развитой шероховатой поверхностью, и порошок железа марки ПЖ2-4М более чем на 90% представлены частицами крупнее 10 мкм и практически не содержат частиц размером менее 1 мкм. Порошок карбонильного железа содержит не менее 30% частиц размером менее 5 мкм и относительно небольшое количество частиц менее 1 мкм. Кроме того, частицы карбонильного железа имеют преимущественно сферическую форму и гладкую поверхность, что будет снижать прочность их адгезионного контакта. Порошок гамма-оксид железа отличается тем, что в нем содержится не менее 10% частиц размером меньше 0,5 мкм, форма которых напоминает сростки игольчатых образцов, которые разрушаются в процессе перемешивания с алмазным шлифпорошком.

Для изучения контактного взаимодействия ферромагнитных частиц с поверхностью алмазных кристаллов были выполнены микрофрактографические исследования на микроанализаторе «Kamskan-4DV» с разрешением изображения до 5–10 нм. Для диагностики химического состава частиц на поверхности алмаза применяли рентгеноспектральный микролокальный химический анализ на этой же установке с автоматической обработкой данных на миникомпьютере системы «Link-860». Микротопографические исследования поверхности алмазов выполняли на установке «StereoScan». Исследования проводили на алмазных шлифпорошках зернистости 400/315 с различным уровнем дефектности. Для адгезионного закрепления ис-

пользовали частицы ферромагнитного порошка карбонильного железа как наиболее сферичные и поэтому более показательные для изучения контактного взаимодействия. На этой же установке получены трехмерные изображения поверхности алмазов и зафиксированы разные положения контакта ферромагнитных частиц карбонильного железа с поверхностью алмазной кристаллической частицы.

На фотографиях рис. 2 представлено закрепление феррочастиц порошков железа в трещинах, кавернах, углублениях шероховатых кристаллов (*а, б, в*). На рисунке 3 показано закрепление феррочастиц на гладких участках поверхности (*а, б, в*). Расположение закрепившихся ферромагнитных частиц на гладких наклонных участках поверхности алмазов (рис. 3, *г, д, ж*) свидетельствует о значи-

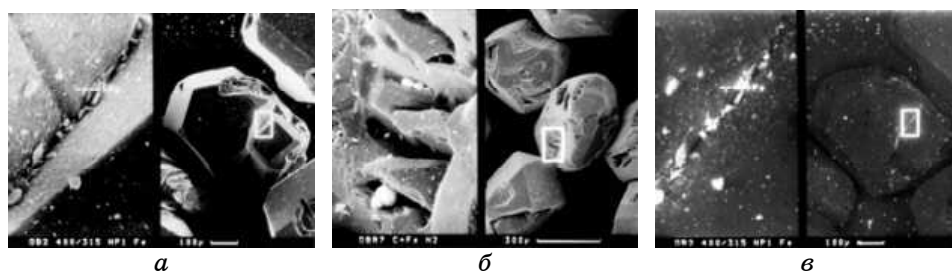


Рис. 2. Закрепление ферромагнитных частиц на шероховатой поверхности алмаза зернистости 400/315 (*а, б, в*).

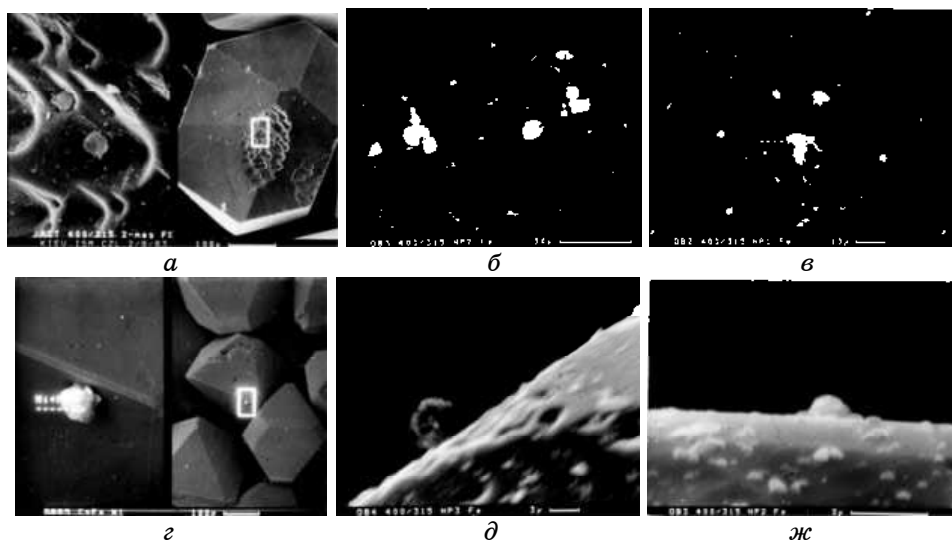
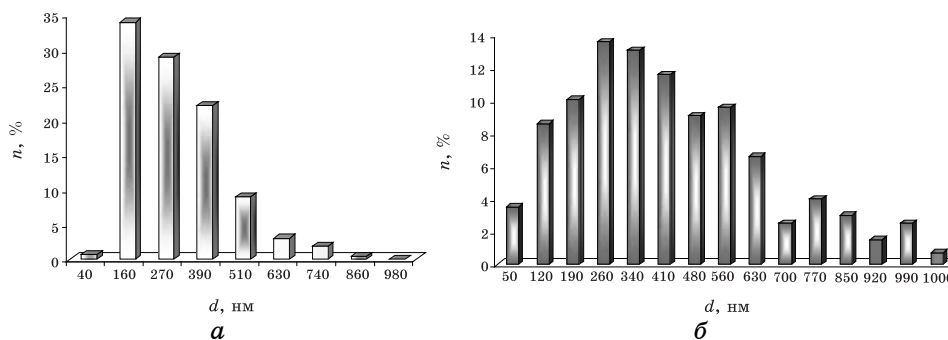


Рис. 3. Закрепление ферромагнитных частиц на гладкой поверхности алмаза зернистости 400/315 (*а-ж*).



**Рис. 4.** Гистограммы распределения закрепившихся на поверхности зерен алмаза феррочастиц по размерам: для гладкого (*a*) и шероховатого (*б*) кристалла алмаза.

тельных силах адгезионного взаимодействия. При этом необходимо отметить, что размеры закрепившихся частиц преимущественно 1–3 мкм, иногда достигают 6–8 мкм и не превышают 10 мкм.

Микрофрактографический анализ позволил раскрыть широкое разнообразие макро- и микродефектов поверхности алмазов и вероятные положения ферромагнитных частиц при контактом взаимодействии с поверхностью шероховатых и гладких кристаллов. Обращает на себя внимание рис. 3, *д*, на котором показано прочное адгезионное закрепление сферической частицы железа размером около 10 мкм на поверхности грани алмазной кристаллической частицы.

Методом растровой электронной микроскопии были исследованы участки поверхности гладких и шероховатых алмазов после закрепления на них частиц гамма-оксид железа. Исследования проведены путем измерения характеристик 200–250 частиц ферромагнитного порошка, закрепившегося на поверхности алмаза. Микрочастицы железа были идентифицированы локальным химическим анализом.

Полученные данные позволили получить распределение закрепившихся на поверхности зерен алмаза феррочастиц по размерам, которое представлено в виде гистограммы для гладкого (рис. 4, *a*) и шероховатого (рис. 4, *б*) кристалла алмаза.

Анализ полученных результатов показывает, что из закрепившихся на гладкой поверхности значительно более 70% имеют размер менее 0,5 мкм (500 нм), а более 50% частиц имеют размер менее 0,3 мкм (300 нм). На шероховатой поверхности также закрепляются частицы размером менее 0,5 мкм (500 нм), но количество частиц размером 0,5–1,0 мкм возрастает в 3–5 раз.

Необходимо отметить, что установленные размеры частиц согласуются со средним размером частиц порошка, выпускаемого производителем. Из этого следует, что на поверхности алмазов преимущественно закрепляются частицы малых размеров. Наблюдается тен-



денция увеличения размера закрепившихся частиц с ростом шероховатости поверхности. Вероятно, это связано с тем, что сила контактного взаимодействия повышается по мере уменьшения размера ферромагнитных частиц и на поверхности алмаза остаются частицы, выступающие в роли носителя, т.е. прочно закрепившиеся.

Таким образом, исследованиями установлено, что подавляющее количество ферромагнитных частиц, закрепившихся на поверхности алмазных кристаллических частиц, имеют размер менее 0,5 мкм (500 нм), что способствует формированию приобретенных магнитных свойств шлифпорошков СТМ.

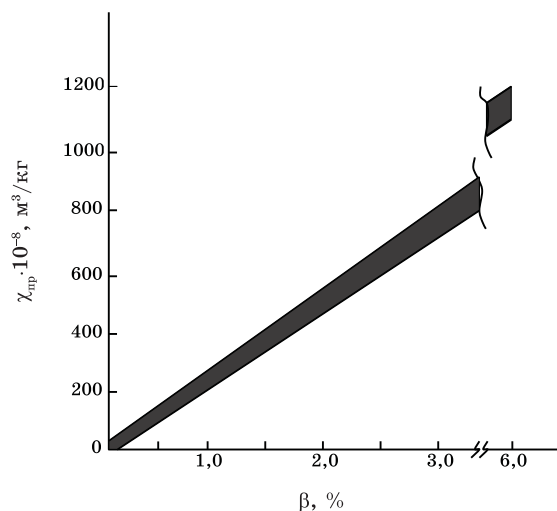
Для оценки магнитных свойств ферромагнитных порошков и шлифпорошков СТМ, а так же их смесей выбрана структурно нечувствительная характеристика удельной магнитной восприимчивости  $\chi$ , которая измеряется методом Фарадея в изодинамическом рабочем зазоре электромагнита при постоянно выбранной характеристике магнитного поля  $HdH/dZ = 23 \cdot 10^{11} \text{ A}^2/\text{м}^3$  [12]. Сущность метода заключается в измерении изменения веса навески под воздействием магнитного поля. Удельная магнитная восприимчивость  $\chi$  рассчитывается по формуле:

$$\chi = \frac{\Delta P}{\mu_0 m HdH/dz} [\text{м}^3/\text{кг}], \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — изменение веса порошка в магнитном поле, кг;  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость, Г/м;  $m$  — масса измеряемого порошка, кг;  $HdH/dz$  — характеристика магнитного поля,  $\text{A}^2/\text{м}^3$ .

Приобретенная магнитная восприимчивость алмазов  $\chi_{\text{пр}}$  с закрепленными ферромагнитными частицами также определяется методом Фарадея. Расчет производится следующим образом. Синтетические алмазные порошки за счет содержания металлических включений имеют естественную магнитную восприимчивость  $\chi_{\text{ест}}$ . После закрепления на поверхности зерен СТМ ферромагнитных микрочастиц можно измерять общую магнитную восприимчивость  $\chi_{\text{общ}}$ . Поскольку эта характеристика относится ко всей массе измеряемых порошков СТМ, то величина приобретенной магнитной восприимчивости  $\chi_{\text{пр}}$  определяется как разность  $\chi_{\text{пр}} = \chi_{\text{общ}} - \chi_{\text{ест}}$  или  $\chi_{\text{общ}} = \chi_{\text{ест}} + \chi_{\text{пр}}$ . Сущность метода определения  $\chi_{\text{пр}}$  заключается в следующем. Первоначально измеряют  $\chi_{\text{ест}}$ , затем на алмазный порошок наносят ферромагнитные частицы и вновь измеряют общую магнитную восприимчивость  $\chi_{\text{общ}}$ . По разнице этих величин рассчитывают  $\chi_{\text{пр}}$ .

Величина приобретенной магнитной восприимчивости  $\chi_{\text{пр}}$  определяется количеством закрепившегося ферромагнитного порошка, которое численно равно коэффициенту поверхностной активности  $K_a$  и магнитной восприимчивости ферромагнитного порошка  $\chi_{\text{ф}}$  [13]. Выполненные исследования показали, что все ферромагнитные час-



**Рис. 5.** Приобретенная магнитная восприимчивость алмазов ( $\chi_{пр}$ ) в зависимости от количества закрепившегося на их поверхности ферромагнитного порошка ( $\beta$ ).

**ТАБЛИЦА 2.** Значения  $K_a$  и  $\chi_{пр}$  алмазных шлифпорошков различных зернистостей.

№ п/п	Марка порошка	Зернистость	Коэффициент поверхностной активности, % ( $K_a$ )	Удельная магнитная восприимчивость $10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг ( $\chi_{пр}$ )
1	АС100	500/400	0,22	65
2	АС15	500/400	3,40	1000
3	АС100	250/200	0,20	59
4	АС6	250/200	4,90	1450
5	АС50	63/50	0,19	56
6	АС6	63/50	3,90	1150

тицы на поверхности алмазов закреплены в один слой, т.е. в виде монослоя. Это основывается на теоретических положениях адгезионного закрепления частиц, которые объясняют, что любая частица стремится занять более устойчивое положение даже путем перемещения по поверхности, а прочность адгезионного контакта увеличивается по мере увеличения площади контакта [14, 15].

Площадь контакта ферромагнитных частиц, расположенных друг над другом в два или более слоев, будет минимальной, а положение энергетически неустойчивым. Поэтому частицы будут стремиться к размещению по поверхности в один слой. Многослойное размещение частиц возможно только при очень больших количествах ферромаг-

нитного порошка или при его высокой остаточной намагниченности.

Для проверки предположения о монослойном расположении ферромагнитных частиц на поверхности зерен алмаза выполнены экспериментальные измерения  $K_a$ , измерения  $\chi_{\text{пр}}$  алмазных шлифпорошков разных марок зернистостей, синтезированных в системе Ni–Mn–C. В качестве ферромагнитного порошка использован железный порошок марки ПЖ2-4М с  $\chi_{\text{ф}} = 2,95 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Результаты исследований приведены в табл. 2, анализ которых показывает устойчивое изменение  $K_a$  и  $\chi_{\text{пр}}$  с изменением марки алмазного шлифпорошка. Необходимо отметить, что даже для низкопрочных алмазных порошков величина  $K_a$  практически не превышает 5%. Это является косвенным подтверждением расположения ферромагнитных частиц в виде монослоя особенно на поверхности зерен особо прочных алмазных шлифпорошков, для которых  $K_a$  в большинстве случаев не превышает 1%.

На рисунке 5 приведена зависимость приобретенной магнитной восприимчивости  $\chi_{\text{пр}}$  порошков алмаза, синтезированных в системе Ni–Mn–C, от величины  $K_a$  для исследуемых ферромагнитных порошков с разной магнитной восприимчивостью от  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  до  $0,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Показано, что даже при величине  $K_a$  до 6% приобретенная магнитная восприимчивость  $\chi_{\text{пр}}$  увеличивается на два-три порядка, что вполне обеспечивает эффективное разделение зерен СТМ в магнитном поле.

Приобретенная магнитная восприимчивость алмазов сохраняется в процессе магнитного разделения только при условии, что сила адгезии ферромагнитных частиц будет превышать силу тяжести зерен алмаза.

Силу адгезии ферромагнитной частицы к поверхности зерна алмаза определяли из основного соотношения сил, обеспечивающих процесс разделения: сила адгезии  $F_{\text{ад}}$  больше силы магнитного притяжения алмазного зерна  $F_{\text{маг}}$ , которая должна быть больше силы тяжести алмазного зерна  $G$ , т.е.

$$F_{\text{ад}} > F_{\text{маг}} > G;$$

здесь

$$F_{\text{ад}} = m_{\text{ф}} a, \quad F_{\text{маг}} = M_A \chi_{\text{пр}} \mu_0 H dH/dz, \quad G = M_A g, \quad (2)$$

где  $F_{\text{ад}}$  — сила адгезии, Н;  $F_{\text{маг}}$  — сила магнитного притяжения, Н;  $G$  — сила тяжести, Н;  $m_{\text{ф}}$ ,  $M_A$  — масса ферромагнитной частицы и алмазного зерна, кг;  $a$ ,  $g$  — ускорение силы адгезии и ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\chi_{\text{пр}}$  — приобретенная магнитная восприимчивость алмаза, м<sup>3</sup>/кг;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума, Гн,  $12,6 \cdot 10^{-7}$ ;  $H dH/dz$  — удельная сила магнитного притяжения, А<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Все величины определяются экспериментально.

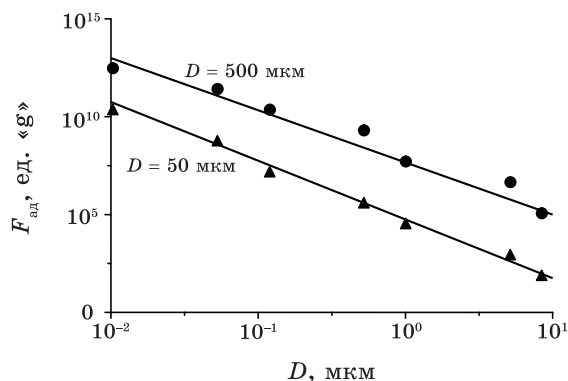


Рис. 6. Зависимость силы адгезии от размера ферромагнитных частиц.

В первом приближении сила адгезии определяется из соотношения  $F_{ад} = G$ :

$$F_{ад} = ma = M_A g \text{ [Н]} \text{ или } a = \frac{M_A}{m_{\phi}} g \text{ [м/с}^2\text{]}. \quad (3)$$

Сила магнитного притяжения свободной ферромагнитной частицы без адгезионного сцепления определяется из баланса силы тяжести и магнитной силы по уравнению:

$$HdH/dz = \frac{g}{\mu_0 \chi_{\phi}} \cong \frac{9,8}{12,6 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 3,9 \cdot 10^{10} \text{ А}^2/\text{м}^3,$$

где  $\chi_{\phi}$  — магнитная восприимчивость ферромагнитного порошка равная  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Таким образом, в магнитном поле сепаратора до начала процесса сортировки алмазов могут быть извлечены все свободные, незакрепившиеся частицы ферромагнитного порошка.

Количество ферромагнитных частиц, прочно закрепившихся на поверхности алмазов, которые не отрываются магнитной силой, в зависимости от дефектности поверхности алмазов, будет изменяться от нескольких процентов (6–4%) и практически до нуля.

Из этого следует, что минимальная удельная сила адгезионного закрепления ферромагнитных частиц, выступающих в роли носителя при магнитной силе  $10^{15} \text{ А}^2/\text{м}^3$ , определяется из соотношения:

$$F_{адг} \geq \mu_0 \chi_{\phi} HdH/dz = 12,6 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{15} = 25,2 \cdot 10^4 \text{ Н/кг} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ г}.$$

Следовательно, для частиц оставшихся на поверхности алмаза, сила адгезии превышает эту величину.

Далее определяем максимально необходимую силу адгезионного

закрепления ферромагнитных частиц разных размеров в пределах от 10 мкм до 0,01 мкм, которая превышает силу тяжести  $P_A$  кристалла алмаза и обеспечивает его подъем в магнитном поле.

Определение производим из условия, что силой сопротивления для отрыва ферромагнитной частицы является сила тяжести кристалла алмаза с размером 500 мкм и 50 мкм.

Составляем соотношения баланса сил:

$$F_{\text{адг}} > P_A, \quad ma > M_A g.$$

Выразив массу частиц через диаметр и плотность, а диаметр кристалла алмаза кратным диаметру ферромагнитной частицы, получаем равенство:

$$a = \frac{M_A g}{m} = \frac{\pi d^3 (K)^3 \rho_A}{\frac{\pi d^3}{6} \rho_\Phi} = \frac{3500 g}{7800} (K)^3 g = 0,45 K^3 g \rho_A,$$

где  $\rho_A$  и  $\rho_\Phi$  — плотность алмазной и ферромагнитной частиц;  $K$  — отношение диаметров алмазной и ферромагнитной частиц.

В качестве примера приведем расчет удельной силы адгезии частицы размером 0,5 мкм (500 нм) на поверхности кристалла размером 500 мкм:

$$a = 0,45 \left( \frac{500}{0,5} \right)^3 g = 0,45 \cdot 10^9 g = 4,5 \cdot 10^8 g \quad \text{или} \quad 4,4 \cdot 10^9 \text{ Н/кг.}$$

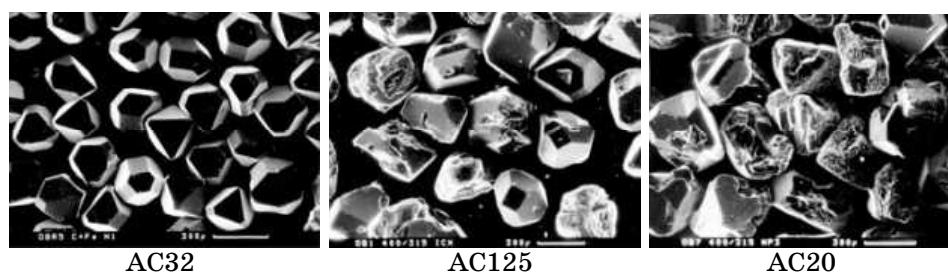
Расчеты выполнены для кристаллов алмаза 500 мкм и 50 мкм и ферромагнитных частиц от 10 мкм до 0,01 мкм. Результаты расчетов максимально необходимой и реально существующей силы адгезионного закрепления приведены на рис.6, из которого следует, что адгезионная сила закрепления возрастает с уменьшением размера ферромагнитных частиц и для них удельная сила отрыва должна быть не менее  $(10^{10} - 10^{13})g$ .

Эксперименты показали, что прочность адгезионного закрепления ферромагнитных частиц значительно превышает силу магнитного отрыва в реальной области значений удельной магнитной силы в применяемых электромагнитных сепараторах.

Избирательное закрепление ферромагнитных частиц на дефектных участках поверхности алмазов в виде монослоя на 1–2 порядка повышает величину магнитной восприимчивости алмазов при одновременном увеличении контрастности магнитных свойств. Все это приводит к убеждению, что направленное повышение контрастности магнитных свойств обеспечит высокую селективность разделения зерен СТМ по приобретенным магнитным свойствам, свя-

**ТАБЛИЦА 3.** Результаты разделения шлифпорошков алмаза зернистостью 500/400 по степени дефектности поверхности в магнитном поле.

Наименование продукта разделения	$\chi_{\text{пр}} \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	$K_a$ , %	$S_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$ , м <sup>2</sup> /г
1	8,4	0,05	3,5
2	10,7	0,12	8,2
3	55,1	0,27	14,0
4	150,8	0,61	16,0
5	169,1	0,88	18,0
6	540,0	1,23	27,0

**Рис. 7.** Порошки алмаза: исходного (АС32), максимальной (АС125) и минимальной (АС20) прочности.

занным с дефектностью поверхности шлифпорошков СТМ.

В таблице 3 приведены результаты разделения в магнитном поле шлифпорошков алмаза зернистостью 500/400, синтезированных в ростовой системе Ni–Mn–C на шесть продуктов, различающейся между собой по приобретенной магнитной восприимчивости  $\chi_{\text{пр}} \cdot 10^{-8}$  дефектности поверхности ( $K_a$ ), удельной поверхности ( $S_{\text{уд}} \cdot 10^{-2}$ ). Различие между крайними продуктами разделения 1 и 6 по  $\chi_{\text{пр}}$  — приблизительно в 60 раз, по  $K_a$  — в 25 раз.

В качестве примера в табл. 4 приведены результаты сортировки зерен алмаза зернистостью 400/315 не только по уровню дефектности поверхности, но и по ряду других свойств. Все полученные порошки различаются по степени дефектности поверхности  $K_a$  и коэффициенту формы зерен  $K_{\text{ф}}$ . По мере снижения  $K_a$  наблюдается увеличение удельного электросопротивления  $\rho$ . Характеристики физико-механических свойств в виде значений статической ( $P$ , Н) и динамической ( $F_i$ , усл. ед.) прочности устойчиво снижаются от первого к шестому продукту. Эта же тенденция сохраняется и для коэффициента термостабильности алмазов. Необходимо отметить, что во всех полученных

**ТАБЛИЦА 4.** Результаты адгезионно-магнитной сортировки алмазов зернистости 400/315.

Наименование характеристики	№ продуктов сортировки						
	исход.	1	2	3	4	5	6
Выход $\gamma$ , %	100,0	1,1	1,7	10,8	26,0	31,1	29,3
Коэффициент поверхностной активности $K_a$ , %	1,47	0,13	0,19	0,24	0,62	1,23	3,04
Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	15,5	0,8	2,7	8,0	10,5	15,2	24,2
Коэффициент формы $K_f$ , усл. ед.	1,25	1,10	1,12	1,18	1,20	1,22	1,28
Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^{10}$ , Ом·м	0,12	18,0	4,2	4,7	0,89	0,06	0,05
Статическая прочность $P$ , Н	76,8	218,5	161,0	130,0	110,0	79,5	33,8
Коэффициент однородности по прочности $K_{одн.пр.}$ , %	22	39	41	45	48	44	40
Динамическая прочность $F_i$ , усл. ед.	21	118	113	54	34	19	16
Коэффициент термостабильности $K_{ст}$ , усл. ед.	0,42	0,88	—	0,75	—	0,48	0,28
Марка (ДСТУ 3292)	АС32	АС125	АС100	АС80	АС65	АС50	АС20

порошках коэффициент однородности по прочности ( $K_{одн.пр.}$ ) увеличивается в 1,8–2,2 раза по сравнению с исходным. Наглядной иллюстрацией разделения зерен алмаза служат приведенные на рис. 7 фотографии алмазных порошков зернистости 400/315: исходного (АС32), максимальной (АС125) и минимальной (АС20) прочности.

По разработанному методу произведены сортировки порошков природных алмазов из месторождений Якутии. На сортировку поступили порошки 4-х зернистостей: 500/400, 630/500, 800/630 и 1000/800. Порошок каждой зернистости разделяли на 3–4 продукта, в каждом из продуктов определяли дефектность поверхности ( $K_a$ ), магнитную восприимчивость и статическую прочность.

Результаты сортировки представлены в табл. 5. Во всех зернистостях полученные продукты значительно различаются по основным характеристикам  $K_a$  и прочности. Прочность алмазов в 1-ом и 3(4)-ом продуктах различаются не менее чем в 2 раза. Коэффициент поверхностной активности для этих же продуктов различается на порядок.

Интересный результат наблюдается по закономерному снижению магнитной восприимчивости по мере уменьшения дефектности поверхности  $K_a$ .

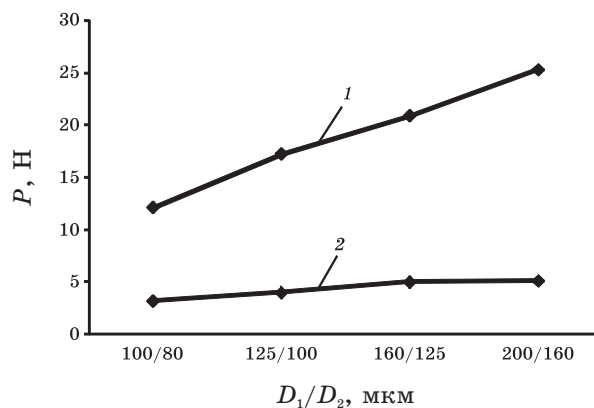


Рис. 8. Прочность порошков различных зернистостей кубического нитрида бора марки КТ после АМС: 1 — порошок с  $P_{\max}$ ; 2 — порошок с  $P_{\min}$ .

ТАБЛИЦА 5. Результаты адгезионно-магнитной сортировки природных алмазов.

Зернистость, мкм	Номер продукта	Выход, %	$K_a$ , %	$\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	$P$ , Н
500/400	1	23,2	0,08	-0,29	213
	2	54,7	0,22	2,52	136
	3	22,1	1,88	3,32	82
	Исходный	100,0	0,55	2,04	142
630/500	1	28,0	0,07	-0,26	288
	2	35,0	0,48	0,29	140
	3	19,9	0,87	3,00	130
	4	17,1	2,05	4,60	120
800/630	Исходный	100,0	0,71	1,41	176
	1	28,9	0,10	-0,27	301
	2	37,3	0,54	2,50	194
	3	33,8	2,30	3,00	150
1000/800	Исходный	100,0	1,00	1,90	210
	1	8,8	0,11	0,09	269
	2	16,0	0,62	0,98	203
	3	39,3	1,15	6,00	186
	4	35,9	2,8	14,60	130
	Исходный	100,0	1,56	7,80	180

Очевидно, существует определенная связь дефектности поверхности алмазов с количеством примесей в природных алмазах и возможно, поэтому адгезионно-магнитная сортировка алмазов с низкой



естественной магнитной восприимчивостью, позволяет получать особо чистые диамагнитные шлифпорошки природных алмазов.

Проведенные опытные испытания подтверждают универсальность процесса адгезионно-магнитного разделения зерен алмаза природного или техногенного происхождения по прочности и другим свойствам.

Были проведены опытные разделения зерен кубического нитрида бора марки КТ разных зернистостей. Результаты разделения шлифпорошков зернистостей 100/80, 125/100, 160/125 и 200/160 представлены на рис. 8, на котором верхняя кривая (1) построена по значениям максимальной прочности полученных фракций разделения, а нижняя кривая (2) — по значениям минимальной прочности. Наблюдается эффективное разделение шлифпорошков разных зернистостей кубонита марки КТ. Шлифпорошки кибора марки КТ различных зернистостей эффективно разделены по прочности на 5 продуктов. Такая тенденция сохраняется при разделении шлифпорошков всех зернистостей.

#### 4. ВЫВОДЫ

Установлено, что ферромагнитные нано- и микрочастицы, закрепившиеся на поверхности зерен шлифпорошков СТМ за счет сил адгезии, позволяют: оценивать степень дефектности поверхности по коэффициенту поверхностной активности  $K_a$ ; создавать новое свойство зерен СТМ — приобретенную магнитную восприимчивость, обеспечивающую высокую контрастность магнитных свойств разделяемых фракций алмазного порошка в зависимости от степени дефектности поверхности зерен.

Установлена зависимость прочности зерен шлифпорошков от степени дефектности поверхности отдельных частиц. Процесс разделения порошков СТМ, разработанный на основе использования металлических микро- и наноматериалов для создания поверхностных сил, обеспечил получение ряда (5–10) порошков СТМ, которые по уровню поверхности и приобретенной магнитной восприимчивости различаются более чем в 60 раз, а по прочности зерен СТМ — более чем в 5 раз.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Новиков, *Развитие технологии синтеза алмазов*. В кн.: *Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя* (Київ: Наукова думка: 1998).
2. А. А. Шульженко, С. А. Божко, А. Н. Соколов и др., *Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора* (Киев: Наукова думка: 1993).
3. Ю. И. Никитин, С. М. Уман, Л. В. Коберниченко, Л. М. Мартынова, *Порошки и пасты из синтетических алмазов* (Киев: Наукова думка: 1992).
4. Г. П. Богатырева, *Синтетические алмазы*, вып. 3: 23 (1972).

5. Н. В. Новиков, Ю. И. Никитин, Б. А. Урюков, С. М. Уман, *Сверхтвердые материалы*, № 6: 29 (1983).
6. Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга, *Адгезия твердых тел* (Москва: Наука: 1973).
7. Н. В. Чураев, *Коллоидный журнал*, 62, № 5: 581 (2000).
8. Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер, *Поверхностные силы* (Москва: Наука: 1985).
9. М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Ф. Невструєв, Г. Д. Ільницька, *Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен* (Пат. 65128 А України, МКИ В03С7/00, В03С1/00 № 2003065195. Заявлено 05.06.2003. Опубл. 15.03.2004. Бюл. № 3).
10. М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Д. Ільницька, Г. Ф. Невструєв, *Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен* (Пат. 25515 України, МПК В03С 7/00, В03С 1/00 № 200703803. Заявлено 05.04.2007. Опубл. 10.08.2007. Бюл. № 12).
11. В. И. Чечерников, *Магнитные измерения* (Москва: МГУ: 1969).
12. Г. Ф. Невструєв, Г. Д. Ільницька, *Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу* (Пат. 65129 А України, МКИ G01N27/12, № 2003065196. Заявлено 05.06.2003. Опубл. 15.03.2004. Бюл. № 3).
13. А. Д. Зимон, *Адгезия пыли и порошков* (Москва: Химия: 1976).
14. Н. Б. Урьев, *Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов* (Москва: Химия: 1988).