

УДК 539.893.621.317.4

Г. Д. Ильницкая, Н. А. Олейник, А. И. Боримский, кандидаты технических наук,
В. Н. Ткач, д-р физ.-мат. наук; **Г. А. Базалий, И. Н. Зайцева, В. В. Тимошенко**

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ И ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ НА РАЗДЕЛЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ В МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ

Представлены результаты исследования физико-механических характеристик шлифпорошка алмаза марки АС 20 зернистостью 100/80, полученного в ростовой системе, содержащей Fe и Si.

Показано, что при разделении порошка в магнитном поле кристаллы сортируются в основном по объемным дефектам, что отражается на физико-механических характеристиках порошка. При разделении порошка в электрическом поле сортируются кристаллы, в основном по дефектам поверхности, что влияет на поверхностную активность порошка.

Ключевые слова: порошки алмазные синтетические, сортировка, магнитное поле, электрическое поле, дефекты кристаллов.

Введение

В инструментальном производстве широко применяют порошки синтетического алмаза при обработке твердого сплава, керамики, стекла и других материалов.

Кристаллы алмаза при синтезе чутко реагируют на изменения локальных условий роста, вследствие чего образуются кристаллы различной формы, степени дефектности и, как следствие, прочности. Для синтетических алмазов характерно разнообразие дефектов, которые в большей или меньшей степени влияют на механические свойства. С позиций технологического разделения порошков алмаза различают три группы дефектов [1]: различие кристаллов по кристаллографической форме, структурные (объемные) дефекты и дефекты поверхности.

Кристаллы алмаза в процессе роста захватывают находящиеся в реакционной камере побочные фазы, например, сплав-растворитель, с образованием объемных дефектов кристаллов. Микрорельеф граней кристаллов отражает особенности их роста. Значительная часть кристаллов синтетических алмазов имеет дефекты поверхности. Это двойники с морфологическими разновидностями, следы разориентации мозаичного и блочного строения, слои роста с макроступенями или спиральями округлой или прямоугольной формы с зазубренными или гладкими кромками, впадины в центре грани различных форм, шероховатость граней, выход на поверхность кристаллов дислокаций, микротрещин, пор и внутрикристаллических включений [2–5].

Как объемные дефекты, так и дефекты поверхности обуславливают магнитные и электропроводные свойства синтетических порошков алмаза, влияют на физико-механические, физико-химические и эксплуатационные характеристики порошков алмаза.

В связи с изложенным для получения порошков алмаза, однородных по физико-механическим и физико-химическим характеристикам, актуальны исследования влияния различных силовых полей на сортировку порошков алмаза.

Известны результаты исследования и сортировки в магнитном и электрическом полях порошков синтетических алмазов, полученных в системе роста Ni–Mn–C [6; 7]. При

использовании систем роста алмаза другого состава вопросы сортировки порошков остаются нерешенными.

Цель настоящей работы – изучить влияние объемных дефектов и дефектов поверхности на разделение порошков синтетических алмазов, полученных в системе роста, содержащей Fe и Si, в магнитном и электрическом полях.

Методика исследования

Исследовали шлифпорошок алмаза марки AC20 зернистостью 100/80, полученный в ростовой системе, содержащей Fe и Si. При подготовке образцов порошка для разделения в различных силовых полях их подвергали тщательной химической обработке, отмыванию и высушиванию. Для исключения влияния неоднородности порошка по линейным характеристикам его сортировали по форме с помощью вибростола.

Фракцию порошка с фиксированным коэффициентом формы и содержания основной фракции (далее – исходный порошок), разделяли в полиградиентном магнитном поле, с учетом различия магнитных свойств кристаллов. После разделения немагнитную фракцию порошка (с минимальной удельной магнитной восприимчивостью), а также исходный порошок разделяли в электрическом поле, с учетом различия проводимости кристаллов.

Для разделения в магнитном поле использовали магнитный сепаратор 138-Т и классическую схему разделения [8], предусматривающую стадийное увеличение границы разделения путем изменения напряженности магнитного поля от 0 до 2 Т.

Для разделения порошка в электрическом поле использовали электрический сепаратор типа ЭС2 и классическую схему разделения при одинаковых параметрах разделения с варьированием только напряжения на отклоняющем электроде (5; 10; 15; 20 кВ), т. е. дискретно изменяли границу разделения [8].

В порошках алмаза, исходном и продуктах разделения, определяли прочность P (Н), содержание основной фракции, коэффициент формы K_f , содержание примесей в виде несгораемого остатка н.о. (масс.%) по методикам ДСТУ 3292 [9], однородность по прочности $K_{одн.пр}$ [10], содержание объемных дефектов при изменении удельной магнитной восприимчивости χ [11], дефектность поверхности K_a [12], удельное электросопротивление ρ [13], коэффициент однородности по линейным размерам $K_{одн.л-р}$ [14], выход фракции γ (масс.%) по методикам, разработанным в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины.

Элементный состав примесей включений в порошках алмаза определяли рентгенофлуоресцентным интегральным анализом, с помощью растрового электронного микроскопа «BS-340» и энергодисперсионного анализатора рентгеновских спектров «Link-860».

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты разделения в магнитном поле на фракции исходного порошка алмаза (после сортировки по форме коэффициент формы составляет 1,17, содержание основной фракции – 91,5%) приведены в таблице 1.

Результаты разделения исходного порошка алмаза в магнитном поле на фракции приведены в табл. 1.

После разделения в магнитном поле получили порошки, в 7 раз различающиеся удельной магнитной восприимчивостью – от $30,7 \cdot 10^{-8}$ м³/кг до $4,2 \cdot 10^{-8}$ м³/кг. По содержанию примесей и включений крайние фракции магнитного разделения различались примерно в 2 раза.

Полученные по результатам разделения порошка в магнитном поле зависимости прочности P (Н) от удельной магнитной восприимчивости χ показаны на рис. 1, а, от дефектности поверхности зерен порошка K_a – на рис. 1 б.

Таблица 1. Характеристика исходного шлифпорошка алмаза марки АС20 зернистостью 100/80 до и после разделения в магнитном поле

Фракция	$\chi, \cdot 10^{-8}$ м ³ /кг	$P,$ Н	$K_{\text{одн. пр.}}$ %	$K_{\text{одн. л.р.}}$ %	$K_a, \%$	Общесодержание включений, масс. %
Магнитная 1	30,7	20,7	71,5	65,1	0,62	1,505
Магнитная 2	18,5	20,1	70,6	65,2	0,54	–
Магнитная 3	5,4	16,3	72,3	65,4	0,37	–
Немагнитная	4,2	15,4	69,4	65,1	0,29	0,765
Исходный порошок (до разделения)	9,0	19,9	65,1	65,3	0,45	1,141

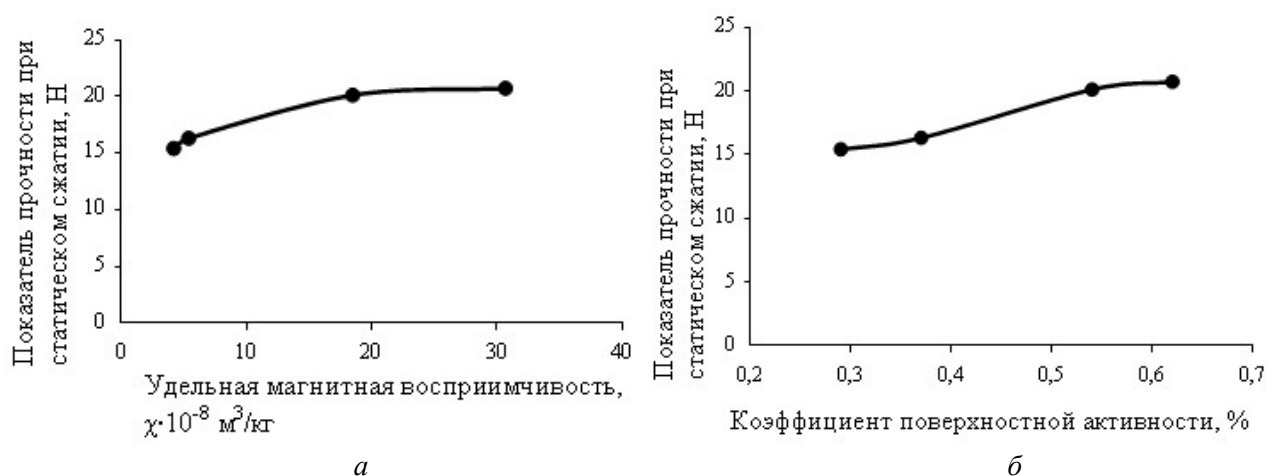


Рис.1. Зависимости прочности шлифпорошков алмаза зернистостью 100/80 после разделения в магнитном поле: а – от удельной магнитной восприимчивости; б – от дефектности поверхности

Как следует из данных рис. 1, с увеличением удельной магнитной восприимчивости вследствие увеличения содержания внутрикристаллических примесей и включений прочность магнитных фракций алмазов повышается незначительно. Так, по сравнению с прочностью немагнитной фракции прочность магнитной фракции № 1 повышается в 1,4 раза. При этом происходит разделение по дефектности поверхности в виде изменения коэффициента поверхностной активности K_a от 0,62% магнитной фракции № 1 до 0,29% немагнитной фракции (рис. 1, б).

В исходном шлифпорошке алмаза, магнитной и немагнитной фракциях определяли элементный состав включений. Результаты определения приведены в табл. 2.

Экспериментально установили, что Fe и Mn во включениях магнитной фракции содержится больше, чем в немагнитной. Это обеспечивается разделением зерен алмаза в магнитном поле по содержанию в алмазе элементов сплава-растворителя. Более высокое содержание включений сплава-растворителя в алмазах магнитной фракции обеспечивает незначительное повышение прочности (см. табл. 1).

При анализе данных элементного состава включений обращает внимание различное содержание Si в порошках алмаза, выделенных в немагнитную и магнитные фракции. Порошки алмаза по содержанию кремния различаются в 2 раза. Вероятно, немагнитный кремний не связан со сплавом-растворителем. Он содержится в кристаллах с

незначительным количеством объемных дефектов и при разделении в магнитном поле концентрируется в немагнитной фракции.

Таблица 2. Элементный состав внутрикристаллических включений в зернах исходного алмазного шлифпорошка

Фракция	Элементный состав, масс %						Общее содержание включений, масс. %
	Si	Ca	Cr	Fe	Mn	Zn	
Немагнитная	0,269	0,007	0,0020	0,468	0,105	0,014	0,865
Магнитная 1	0,137	0,005	0,018	0,977	0,358	0,010	1,505
Исходная	0,243	0,003	0,014	0,701	0,171	0,009	1,141

Результаты разделения на фракции исходного порошка в электрическом поле приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики продуктов разделения исходного алмазного порошка в электрическом поле

Напряжение, кВ	Номер фракции	ρ , 10^7 , Ом·м	γ , %	χ , 10^{-8} кг/м ³	н.о., масс. %	K_a , %
5	1	0,2	2,1	12,0	3,5	0,6
	2	0,5	50,5	9,5	2,9	0,5
	3	2,8	47,4	8,4	3,0	0,4
	До разделения	1,5	100,0	9,0	3,2	0,5
15	1	0,1	2,1	13,0	4,3	0,6
	2	0,5	7,9	12,0	4,2	0,6
	3	1,1	67,6	10,0	3,0	0,5
	4	2,5	15,4	5,1	2,7	0,4
	5	7,5	7,6	3,0	2,5	0,4
	До разделения	1,5	100,0	9,0	3,2	0,5

Как следует из данных табл. 3, фракции порошка существенно различаются удельным электросопротивлением. Различие характеристик фракций с максимальным различием удельного электросопротивления относительно наименее электропроводной фракции при напряжении отклоняющего электрода 5 и 15 кВ соответственно следующее: содержание примесей – 16,6 и 72,0%; удельная магнитная восприимчивость – 42,0 и 33,3%, соответственно. Различие фракций по коэффициенту поверхностной активности не зависит от напряжения отклоняющего электрода и составляет 50%. Таким образом, разделение исходного порошка по электропроводности происходит под влиянием как объемных дефектов, так и дефектов поверхности, причем при увеличении напряжения отклоняющего электрода влияние внутренних дефектов усиливается.

Результаты разделения немагнитной фракции исходного алмазного порошка в электрическом поле на фракции приведены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристики продуктов разделения немагнитной фракции исходного алмазного порошка в электрическом поле

Напряжение, кВ	Номер фракции	$\rho, \cdot 10^7$, Ом·м	γ , %	$\chi, \cdot 10^{-8}$, кг/м ³	н.о., масс. %	K_a , %
10	1	1,3	34,0	5,5	1,7	0,5
	2	2,1	40,3	4,0	1,5	0,3
	3	7,0	17,3	3,8	1,2	0,2
	4	14,7	8,4	3,7	1,1	0,1
	до разделения	3,2	100,0	4,2	1,5	0,3
20	1	0,2	1,1	5,7	1,9	0,5
	2	0,3	17,6	5,5	1,6	0,4
	3	1,0	60,0	4,1	1,5	0,5
	4	9,8	12,9	3,9	1,2	0,3
	5	14,7	8,4	3,8	1,1	0,1
	до разделения	3,2	100,0	4,2	1,5	0,3

Сравнив характеристики порошка, поступившего для разделения, пришли к выводу, что порошок немагнитной фракции содержит в 2,1 раза меньше примесей в виде несгораемого остатка, чем исходный (табл. 3 и табл. 4), имеет в 2,1 раза более низкую удельную магнитную восприимчивость и в 1,7 раза – коэффициент поверхностной активности.

Как следует из данных табл. 4, различие характеристик фракций порошка с максимальным различием удельного электросопротивления относительно наименее электропроводной при напряжении отклоняющего электрода 5 и 15 кВ соответственно следующее: содержание примесей – 54,5 и 72,7%; удельная магнитная восприимчивость – 48,6 и 50,0 %. Различие фракций по коэффициенту поверхностной активности не зависит от напряжения отклоняющего электрода и составляет 400 %. Таким образом, на разделение немагнитной фракции по электропроводности, как и исходного порошка, влияют как объемные дефекты, так и дефекты поверхности, но влияние последних более выражено. При повышении напряжения отклоняющего электрода влияние внутренних дефектов усиливается.

К аналогичным выводам приходим в результате изучения зависимости удельного электросопротивления продуктов разделения исходного порошка и продуктов разделения немагнитной фракции порошка от их удельной магнитной восприимчивости, а также зависимости коэффициента поверхностной активности продуктов разделения исходного порошка и продуктов разделения немагнитной фракции порошка от их удельной магнитной восприимчивости, от их удельного электросопротивления (рис. 2, 3).

Как следует из данных рис. 2, на результаты разделения в электрическом поле исходного порошка (кривые 1, 2), имеющего широкий спектр объемных дефектов и дефекты поверхности, существенно влияют объемные дефекты, характеризующиеся широким диапазоном удельной магнитной восприимчивости. При повышении напряжения отклоняющего электрода от 5 кВ до 15 кВ выделяются фракции порошка значительно различающиеся как электросопротивлением

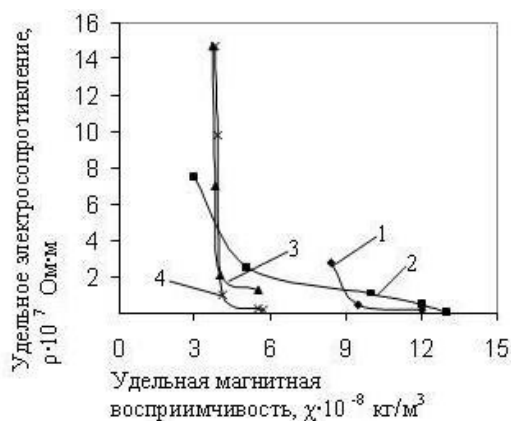


Рис. 2. Зависимости удельного электросопротивления продуктов разделения исходного порошка при напряжении отклоняющего электрода 5 кВ (1); 15 кВ (2) и продуктов разделения немагнитной фракции порошка при разделении при напряжении отклоняющего электрода 10 кВ (3); 20 кВ (4) от их удельной магнитной восприимчивости

отклоняющего электрода от 5 кВ до 15 кВ выделяются фракции порошка значительно различающиеся как электросопротивлением (соответственно $0,2-2,8 \cdot 10^7$ и $0,1-7,5 \cdot 10^7$ Ом·м), так и удельной магнитной восприимчивостью ($8,4-12$ и $3,0-13 \cdot 10^{-8}$ кг/м³). На результаты разделения в электрическом поле немагнитной фракции порошка (кривые 3, 4 на рис. 2), с узким диапазоном удельной магнитной восприимчивости ($3,7-5,7 \cdot 10^{-8}$ кг/м³) имеющего объемные дефекты и дефекты поверхности, наиболее существенно влияют дефекты поверхности. Об этом свидетельствует широкий диапазон удельного электросопротивления ($0,2-14,7 \cdot 10^7$ Ом·м) фракций, полученных поле

разделения. При этом повышение напряжения отклоняющего электрода от 10 до 20 кВ несущественно влияет на кривые. Отличием является возможность выделения кристаллов с низким удельным электросопротивлением ($0,2 \cdot 10^7$ Ом·м) при напряжении 20 кВ.

Интерес представляют зависимости коэффициента поверхностной активности продуктов разделения исходного порошка и немагнитной фракции порошка от их удельной магнитной восприимчивости от удельного электросопротивления (рис. 3).

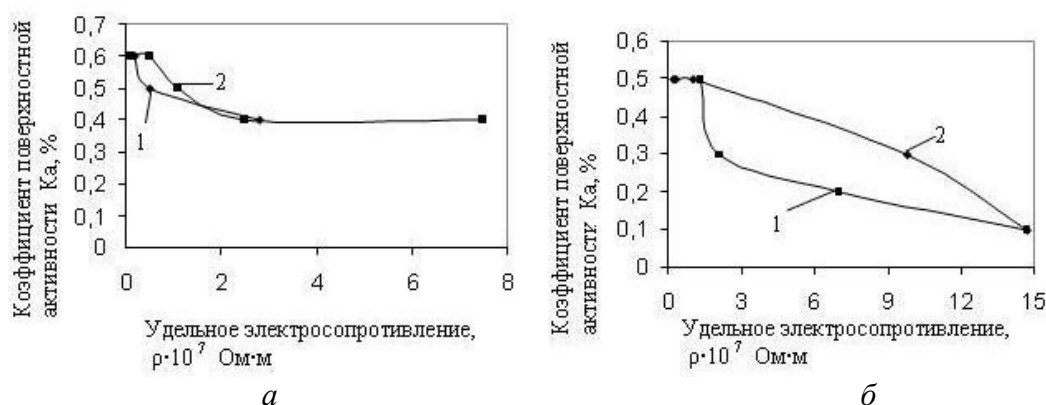


Рис. 3. Зависимости коэффициента поверхностной активности продуктов разделения исходного порошка (а) при напряжении отклоняющего электрода 5 кВ (1); 15 кВ (2) и продуктов разделения немагнитной фракции порошка (б) при разделении при напряжении отклоняющего электрода 10 кВ (1); 20 кВ (2) от их удельного электросопротивления

Как следует из кривых 1, 2 на рис. 3, а, исходный порошок и немагнитную фракцию порошка, содержащие кристаллы с широким спектром удельного электросопротивления, можно разделить в электрическом поле на фракции, различающиеся коэффициентом поверхностной активности.

Как следует из кривых 1, 2 на рис. 3, б, разделение в электрическом поле порошка немагнитной фракции, содержащего значительно меньше объемных дефектов, происходит в основном под влиянием дефектов поверхности на фракции, существенно различающихся электросопротивлением и коэффициентом поверхностной активности.

Полученные результаты обусловлены механизмом разделения дисперсных систем в электрическом поле. Электрическую сепарацию по электропроводности применяют для разделения дисперсных частиц материалов с различной электрической проводимостью. Электропроводность частиц охватывает объемную и поверхностную составляющие, определяется наличием внутрикристаллических примесей и включений и состоянием их поверхностей.

Как известно, физико-химические свойства поверхности и ее активность зависят от наличия дефектов поверхности, способствующих образованию свободных валентных связей, на которые могут сорбироваться различные группы, в том числе гидроксильные, что влияет на электропроводность частиц [15–17].

При электросепарации, когда частицы алмаза попадают в пространство между двумя электродами электрическое поле сильнее отклоняет более заряженные частицы (с большим значением заряда). В процессе осаждения частиц образуется веер траекторий, что способствует образованию фракций порошка с разной электропроводностью [8, 18].

Выводы

Магнитные характеристики порошка алмаза, полученного в ростовой системе, содержащей Fe и Si, определяются наличием объемных (металлических, магнитных) включений в кристаллах и предопределяют возможность сортировки порошка в магнитном поле.

Разделение порошка в магнитном поле приводит к сортировке кристаллов преимущественно по объемным дефектам, а также дефектам поверхности и позволяет получать порошки, существенно различающиеся содержанием примесей, удельной магнитной восприимчивостью, прочностью при статическом сжатии, однородностью по прочности и линейным размерам, коэффициентом поверхностной активности.

Электропроводные характеристики порошка алмаза определяются наличием объемных (металлических, магнитных) включений в кристаллах и дефектов поверхности. Последние имеют тенденцию сорбировать группы OH⁻, тем самым влияя на электропроводность кристаллов. Это и предопределяет возможность сортировки порошка в электрическом поле.

Разделение порошка в электрическом поле приводит к сортировке кристаллов преимущественно по дефектам поверхности и позволяет получать порошки, существенно различающиеся содержанием примесей, удельным электросопротивлением и коэффициентом поверхностной активности.

Наведено результати дослідження фізико-механічних характеристик шліфпорошку алмазу марки АС 20 зернистістю 100/80, отриманого в ростовій системі із вмістом Fe і Si.

Показано, що при розподілі порошку в магнітному полі кристали сортуються, переважно, за об'ємними дефектами, що впливає на фізико-механічні характеристики порошку. При розподілі порошку в електричному полі кристали сортуються, переважно за дефектами поверхні, що впливає на поверхневу активність порошку.

Ключові слова: порошки алмазні синтетичні, сортування, магнітне поле, електричне поле, дефекти кристалів.

EFFECT OF VOLUME DEFECTS AND SURFACE DEFECTS ON THE SEPARATION OF SYNTHETIC DIAMONDS IN MAGNETIC AND ELECTRIC FIELDS

Results of the study of physical and mechanical properties of powder diamond brand AC 20 grain 100/80 produced in the growth system, containing Fe and Cu, are presented.

Sorting crystals, mainly by volumetric defects, is occurred in the separation of the powder in a magnetic field. This is reflected in the physical and mechanical characteristics of the powder. Sorting crystals, primarily by surface defects, is occurred in the separation of the powder in an electric field. This is reflected in the value of the surface activity of the powder.

Key words: synthetic diamond powder, sorting, magnetic field, electric field, the crystal defects.

Литература

1. Ильницкая Г. Д. Влияние структуры кристаллов алмаза на физико-механические свойства алмазных шлифпорошков // Надтверді матеріали: створення та застосування (Сер. „Матеріалознавство”) : зб. наук. пр. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2007. – 234 с.
2. Примеси и включения в синтетических алмазах и их влияние на структуру и свойства кристаллов А.С. Вишнеvский, П.А. Шульман, Г.А. Подзярей, А.В. Белянкина // Синтетические алмазы в промышленности. – К. : Наук. думка, 1974. – С. 41–47.
3. Природные и синтетические алмазы / Г. Б. Бокий, Г. Н. Безруков, Ю. А. Ключев и др. – М. : Наука, 1986. – 222 с.
4. Новиков Н. В. Развитие технологии синтеза алмазов // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – К.: Наук. думка, 1998. – С. 333–352.
5. Чепуров А. И., Пальянов Ю. Н. Влияние условий образования на морфологию и дефекты кристаллов алмаза // Экспериментальная петрология высоких давлений. – Новосибирск: ИГ и Г СО АН СССР, 1981. – С. 59–64.
6. Никитин Ю. И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1981. – 264 с.
7. Невструев Г. Ф., Ильницкая Г. Д. Свойства алмазных порошков, полученных магнитной сепарацией // Физика и техника высоких давлений. – 1988. – № 29. – С. 53–56.
8. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессе обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
9. ГОСТ 3292-95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 72 с.
10. Методика аналитической оценки прочностных характеристик шлифпорошков сверхтвердых материалов (СТМ). М 28.5-272:2008. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 14 с.
11. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ). У 90.256-2004. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2004. – 9 с.
12. Пат. на винахід № 65129, Україна, МКІ G01N27/12. Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г. Ф. Невструєв, Г. Д. Ильницка. – Опубл. 15.03.2004; Бюл. № 3.

13. Методика определения удельного электрического сопротивления дисперсных порошков сверхтвердых материалов. М 23.9-303:2014. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2014. – 6 с.
14. Методика аналитической оценки линейных размеров зерен порошков сверхтвердых материалов (СТМ). М 28.5-271:2008. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 18 с.
15. Чураев Н. В. Развитие исследований поверхностных сил // Коллоидный журн. – 2000. – 62. – № 5. – С. 581–589.
16. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
17. Урьев Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. – М.: Химия, 1988. – 256 с.
18. Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости / С. А. Кривов дисс. д-ра техн. наук. – М. : 2000. – 348 с. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-nauchnykh-osnov-elektricheskoi-separatsii-po-provodimosti>.

Поступила 06.06.16

УДК 620.22

А. Ф. Лисовский, Н. А. Бондаренко, доктора технических наук

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИЦИИ АЛМАЗ–WC–Co

Рассмотрены особенности формирования структуры межфазной поверхности алмаз/WC–Co матрица. Предложен механизм массопереноса атомов углерода в композиции алмаз-WC–Co в период ее спекания. Определены перспективные направления формирования непосредственного контакта частиц алмаза и WC–Co матрицы без образований включений графита.

Ключевые слова: композиция алмаз-WC–Co, массоперенос углерода.

Введение

Композиция алмаз-WC–Co состоит из частиц алмаза размером 300–800 мкм и WC–Co матрицы. В матрице содержатся 80–90 об.% частиц карбида WC размером 0,5–5 мкм, сцементированных кобальтом, и 10 – 20 об.% кобальта. Композицию алмаз-WC–Co применяют в породоразрушающих элементах горного инструмента. Непосредственно с породой взаимодействуют частицы алмаза. В этой связи работоспособность горного инструмента зависит от удержания частиц алмаза WC–Co матрицей [1], что определяется структурой межфазной границы алмаз/матрица. Таким образом, при создании горного инструмента на основе композиционных алмазосодержащих материалов центральной проблемой является формирование требуемой структуры на межфазной поверхности алмаз/матрица.

Для исследования структуры межфазной поверхности алмаз/матрица [2] использовали трансмиссионную электронную микроскопию с разрешающей способностью 2 нм. В результате на межфазной поверхности алмаз/матрица обнаружили включения графита