

УДК 621.921.34-492.544.023.5:539.215

В. Г. Полгорацкий, канд. техн. наук; **В. И. Лавриненко**, **Г. А. Петасюк**, доктора технических наук; **О. В. Лещенко**, **Ю. П. Ущаповский**

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

КОМПОЗИЦИОННЫЕ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО АЛМАЗА, КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА И КАРБИДА БОРА. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМЫ ПРОЕКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖУЩИХ КРОМОК ЗЕРЕН ПОРОШКОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрены особенности получения композиционных и поликристаллических порошковых материалов на основе сверхтвердых материалов (СТМ) при высоких и низких давлениях; в частности, описан метод изготовления порошков, полученных из композиционных материалов с углеродной связкой. Приведены результаты сравнительных исследований формы проекции и характеристик режущих кромок зерен абразивных порошков. Установлено, что при использовании этих порошков в шлифовальном инструменте эффективность его применения повышается в 2–3 раза.

Ключевые слова: порошки синтетического алмаза, микропорошки природного алмаза, порошки кубического нитрида бора, порошки карбида бора, углеродная связка, компакты, композиционные порошки, шлифпорошки.

Введение

К основным направлениям развития современного материаловедения сверхтвердых материалов относятся получение – как в условиях высоких давлений и высоких температур, так и при низких давлениях – и применение поликристаллических и композиционных СТМ. Поликристаллические и композиционные порошки изготавливают из спеченных композитов на основе синтетического алмаза или кубического нитрида бора (КНБ). Например, порошки на основе синтетического алмаза (АРВ1, АРК4, АРС3, АРС4, АСБ, АСПК, карбонит) и КНБ (киборит, гексонит) получают дроблением спеченного в камере высокого давления композита и последующей классификацией и сортировкой зерен [1–4].

Хорошие физико-механические и термопрочностные свойства графита и ряда других переходных форм углерода указывают на целесообразность его использования в качестве матриц композиционных сверхтвердых материалов. Заметим, что такие материалы встречаются в природе и могут быть синтезированы при высоких давлениях и высоких температурах.

Поликристаллические алмазы типа баллас (АСБ) и карбонадо (АСПК) представляют собой кристаллы алмаза размером от десятков (АСПК) до сотен (АСБ) мкм, связанные между собой одной из переходных форм углерода, т. е. могут быть рассмотрены как сверхтвердые углеродные композиционные материалы [5]. Сочетание физико-химических и механических свойств алмазных кристаллов и углеродной матрицы обуславливает эффективность применения АСПК и АСБ в инструменте. Кроме того, особо значимым фактором является возможность получения дефицитных поликристаллов размером более 630 мкм в промышленном масштабе [6].

Использование поликристаллических композиционных зерен, состоящих из мелких частиц СТМ, связанных в единый прочный материал, с теоретической точки зрения представляется оправданным. Действительно, на поверхности такого зерна одновременно существуют несколько режущих кромок, принадлежащих отдельным частицам. В процессе работы происходит постепенное микроразрушение поверхностного слоя зерна, удаление отдельных частиц и воссоздание исходного рельефа и структуры поверхности.

При статическом синтезе алмаза и КНБ наряду с порошками, пользующимися большим спросом, имеется значительный выход порошков, которые в настоящее время имеют ограниченное применение в инструменте. Решить проблему использования порошков более мелких «неходовых» зернистостей и даже неклассифицированных алмазных и кубонитовых порошков, оказалось возможным благодаря разработке и техническому обеспечению процесса получения композиционных порошков (конгломерация мелких и дробление крупных зерен), в результате получают более ценные крупные зерна и шлифпорошки. Перспективным является также активированное спекание нанопорошков алмаза и КБН при высоких давлениях и высоких температурах [7].

Представляют интерес работы, посвященные получению композиционных материалов на основе СТМ, в том числе структурированных углеродной связкой, другими способами – при низких давлениях [8].

Несмотря на широкую гамму марок порошковых сверхтвердых материалов, выпускаемых промышленностью по традиционным технологиям, продолжается поиск альтернативных методов получения таких материалов, в том числе создание композиционных СТМ [6].

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними.

Металлоалмазные композиты, имеющие ветвистую, звездчатую структуру с большим числом выступов и впадин, позволили значительно улучшить эксплуатационные свойства инструмента на основе этого материала. Основные достоинства морфологии поверхности полученных композиционных материалов – большая шероховатость, улучшающая их закрепление в традиционных связках, и множество выходящих на поверхность режущих граней. Однако невысокие термопрочностные свойства металлической матрицы ограничивают использование металлоалмазных материалов при повышенных нагрузках [9, 10].

Композиционные материалы с неметаллической матрицей нашли широкое применение. В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные, стеклянные и керамические материалы [11]. Полимерные матрицы являются одним из самых многочисленных видов, чаще всего используются эпоксидная, фенолформальдегидная и полиамидная матрицы. Угольные матрицы – коксованные или пироуглеродные – получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу.

Матрица связывает композицию, придавая ей форму. Упрочнителями (армирующие элементы или наполнители) служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.), а также металлические (проволоки), обладающие высокой прочностью и жесткостью. Армирующие элементы могут иметь вид волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей. Содержание упрочнителя в ориентированных материалах составляет 60–80 % (об.), в неориентированных (с дискретными волокнами и нитевидными кристаллами) – 20–30 % (об.). Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного материала [12]. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению. По виду упрочнителя композиционные

материалы классифицируют на стекловолокниты, карбоволокниты с углеродными волокнами, борволокниты и органоволокниты.

В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим, укладываются параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоскостные слои собираются в пластины, что придает материалу анизотропные свойства. Для работы материала в изделии важно учитывать направление действующих нагрузок. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композиционных материалов. От порядка укладки слоев по толщине пакета зависят изгибные и крутильные жесткости материала. Следовательно, можно создавать как изотропные, так и анизотропные материалы [13].

Методы получения композиционных материалов с углеродным связующим. Сверхтвердые углеродные композиционные материалы можно получать, сращивая отдельные алмазные зерна углеродным связующим, представляющим собой сочетание атомов углерода в различных гибридных состояниях (sp^3 , sp^2 , sp), синтез которого осуществляется из смеси определенных углеродсодержащих веществ [14].

В результате научно-прикладных исследований, проведенных в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, обоснована возможность обеспечения оптимального соотношения технической эффективности производства и использования сверхтвердых материалов.

Обычные области применения композитов на основе СТМ – шлифовальные и полировальные порошки и пасты; шлифовальный и режущий инструмент; полировальные составы: пасты, суспензии; конструкционные материалы.

Новым направлением получения материалов со свойствами поликристаллов и композитов является использование структурированной углеродной связки для получения сверхтвердых алмазосодержащих композиционных материалов при низких давлениях углеродсодержащего газа ($2,5 \cdot 10^4 - 5,1 \cdot 10^4$ Па) и температуре 1273–1523 К. Композиционные материалы, изготовленные при низких p, T -параметрах имеют необходимые размеры продукта (10 мм), что позволяет получать из него крупнозернистые порошки с размером зерен 0,5–3,0 мм. Также, по сравнению с исходными порошками, улучшаются некоторые свойства синтезированных материалов, например, термостабильность [8, 15].

Актуальность проблемы целенаправленного получения композиционных алмазосодержащих материалов с углеродной связкой и дифференцированными свойствами определяется необходимостью создания алмазного инструмента и паст нового поколения [8].

Для решения поставленной задачи были разработаны теоретические основы изготовления композиционных компактов из микропорошков КНБ зернистости менее 3 мкм методом физико-химического синтеза и получения прочного углеродного связующего частиц микропорошка в условиях поликонденсации при температуре 1473 К и давлении ниже атмосферного в среде метана.

В связи с изложенным, важным является изучение особенностей получения при давлении ниже атмосферного композиционного материала на основе СТМ из порошков разных сверхтвердых и абразивных компонентов; диффузионной кинетики проникновения по глубине слоя порошка углеродной связки и последующий выбор компонентов и оптимальных режимов получения углеродной связки. Повысить эффективность шлифования твердых сплавов и быстрорежущих сталей шлифовальными кругами можно за счет использования порошков из композиционных материалов.

Опыт работы авторов в данной области материаловедения и данные литературных источников дают основания сделать вывод о целесообразности создания абразивных сверхтвердых композиционных материалов на основе синтетического и природного алмаза,

кубического нитрида бора, карбида бора, структурированных углеродной связкой при давлении ниже атмосферного.

Из работ [1, 2, 5, 8, 9, 13] следует, что сочетание высоких физико-химических и механических свойств алмазных кристаллов и углеродной матрицы обуславливает ценность композиционных сверхтвердых материалов (типов АСПК и АСБ) для использования в инструменте. Однако в настоящее время сверхтвердые поликристаллические зерна широко не используют, прежде всего из-за сложности получения композитов на основе СТМ (дорогая оснастка) [2, 5]. Установлено также, что композиты на основе СТМ, полученные при низких давлениях, позволили значительно улучшить эксплуатационные свойства инструмента на основе этого материала [13].

Результаты исследования.

Были исследованы размерные и морфометрические характеристики композиционных шлифпорошков зернистости 125/100 (К 125/100), изготовленных из смеси шлифпорошка АС6 125/100 и микропорошков природного алмаза (отходы гранильного производства). Определяли максимальный и минимальный Ферет-диаметры, средний диаметр, удельную поверхность, количество режущих кромок, среднее значение углов заострения режущих кромок, количество зерен в 1 ст композиционного порошка, а также показатели однородности по морфометрическим характеристикам (табл. 1) [16–18].

Таблица 1. Средние значения и однородность морфометрических характеристик, внешняя удельная поверхность (F_{ys}), количество режущих кромок (n), среднее значение углов заострения режущих кромок (Φ), количество зерен в 1 ст (n_z) композиционного шлифпорошка К 125/100

Характеристика	Шлифпорошок К 125/100	
	Среднее значение	Однородность
F_{max} , мкм	164,7	0,5938
F_{min} , мкм	116,8	0,5968
d_c , мкм	140,7537	0,6391
F_{yn} , м ² /кг	41,32	–
n_z	65063	–
n	12	–
Φ , град	106	–

Сравнительные данные о количестве режущих кромок и среднем угле заострения композиционного шлифпорошка К 125/100 и стандартных шлиф-порошков АС15 125/100, АС6 80/63, АС6 50/40 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные данные о количестве режущих кромок и среднем угле заострения

Шлифпорошок	АС6 125/100	АС6 80/63	АС6 50/40	К 125/100
n	7	5	4	12
Φ , град	127	120	117	106

Согласно данным табл. 1 и табл. 2, количество режущих кромок зерен композиционных порошков в 2 раза больше, чем у стандартных алмазных порошков, а угол заострения меньше на 10–20 %. Значения показателей почти всех размерных и геометрических характеристик продиагностированных шлифпорошков хорошо коррелируют с ситовой зернистостью. Это свидетельствует о высоком качестве порошков по зерновому составу, что подтверждается достаточно высокими показателями однородности этих характеристик [18].

Порошки из композиционного материала на основе микропорошков природного алмаза и стандартного шлифпорошка АС6 160/125 (К 160/125) были изготовлены на соответствующем дробильно-классификационном оборудовании и классифицированы на вибростолах на оптимальных режимах. Исследуемые в настоящей работе морфометрические характеристики шлифпорошка, изготовленного из этого композиционного материала, структурированного углеродной связкой (рис. 1), были продиагностированы прибором DiaInspect.OSM [17].

В совокупность анализируемых данных были включены характеристики формы проекции зерен и их режущих кромок (количество и среднее значение углов заострения



Рис. 1. Композиционный шлифпорошок К 160/125, изготовленный из компактов на основе шлифпорошков АС6 125/100 и микропорошков природного алмаза зернистости 3/0

режущих кромок). Результаты анализа морфометрических характеристик и других технологических свойств, физико-механических и электрофизических свойств таких порошков приведены в нашей статье [18].

Идентификация формы проекции зерен и определение количества (n) и среднего значения (Φ) углов заострения режущих кромок были выполнены на основании данных DiaInspect-диагностики морфометрических характеристик по разработанной в ИСМ материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины оригинальной компьютерно-аналитической методикам [19, 20]. Результаты диагностики приведены в табл. 3. Для сравнения там же приведены значения

аналогичных характеристик стандартных по [16] шлифпорошков АС6 160/125 и АС6 125/100.

Таблица 3 Значения морфометрических характеристик и технологических свойств шлифпорошков К 160/125 и К 125/100, изготовленных из нового композиционного материала, и аналогичных по зернистости стандартных шлифпорошков марки АС6

Характеристика	Шлифпорошок			
	Композиционный		Стандартный АС6	
	160/125	125/100	160/125	125/100
n	14	12	11	7
Φ , град	102	106	118	127

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать следующий вывод: порошки из композиционного абразивного материала превосходят аналогичные по зернистости стандартные шлифпорошки по количеству режущих кромок и углу заострения.

Относительно использования композиционных порошков в алмазно-абразивной обработке: особо следует отметить, что шлифпорошок К 160/125 существенно отличается от аналогичных по зернистости стандартных шлифпорошков АС6 160/125 и АС6 125/100. Шероховатость проекции зерен этого шлифпорошка выше, внешняя удельная поверхность и количество режущих кромок зерен больше, что свидетельствует о более развитой поверхности зерен. Наблюдается также весьма существенное различие сравниваемых порошков по удельному электросопротивлению (ρ): значение ρ шлифпорошка К 160/125 несравнимо меньше, чем у принятых в качестве базы сравнения стандартных шлифпорошков [18].

Количественное оценивание геометрической формы проекции зерен осуществлялось системно-аналоговым методом [20]. Этот метод представляет два типа показателей формоподобия фактической проекции зерен анализируемого порошка по итогам идентификации формы проекции отдельных зерен: дифференциальные ($f_m^{(d)}$) и интегральные ($f_m^{(i)}$). Первые отражают относительную долю (%) зерен в диагностированной пробе, проекция которых совпала с формой данной базовой фигуры-аналога (БФА) с номером m .

Числовое значение дифференциальных показателей выражается зависимостью

$$f_m^{(d)} = \frac{N_m}{N} 100, \quad (1)$$

где m – номер БФА, $m = 1, 2, \dots, M$; M – количество БФА; N_m – количество зерен, форма проекции которых была идентифицирована как БФА с номером m .

Из всех дифференциальных показателей наибольший интерес представляет имеющий максимальное значение. Именно по этому максимальному показателю, собственно, и устанавливается дифференциальное формоподобие проекции конкретных зерен абразивного порошка.

Погрешность формозамены, которая является количественной оценкой адекватности формозамены для каждого из классов N_m , определяется зависимостью

$$\Delta_m^{(d)} = \frac{1}{n_m} \sum_{n=1}^{n_m} \delta_n, \quad (2)$$

где $\delta_n = \min_{1 \leq m \leq M} \{q_{mn}\}$ – минимальная погрешность формозамены проекции зерна

с номером n ; m – номер соответствующей БФА. Суммирование осуществляется для всех классов, не являющихся пустыми, и для тех зерен, которые оказались в каждом из классов N_m , n_m – количество зерен в таком классе.

Интегральная формоподобность основана на том, что фактическая форма проекции зерна с определенной погрешностью (адекватностью) может быть заменена каждой из БФА. Зависимость для определения интегрального показателя формоподобия получена [20] в виде

$$f_m^{(i)} = \frac{1}{10N} \sum_{n=1}^N S_m, \quad (3)$$

где N – количество зерен в анализируемой пробе, S_m ($m = 1, 2, \dots, M$) – рейтинговая оценка для каждой из БФА.

Наиболее высокий показатель интегрального формоподобия соответствует той БФА, для которой значение $f_m^{(i)}$ максимально. Показатели интегрального формоподобия по формуле (3) принимают значения из интервала (0, 1). При этом максимальное значение, равное 1, наблюдается в том случае, если данной БФА было присвоено первое место для каждого зерна из проанализированной пробы. Относительная погрешность замены определяется по формуле:

$$\Delta_m^{(i)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_{n,m}, \quad (4)$$

где $q_{n,m}$ – относительная погрешность интегральной формозамены проекции зерна с номером n базовым аналогом с номером m . Более детально вывод формул (1) – (4) и алгоритм их применения описаны в работах [20, 21].

Результаты сравнительного анализа формы проекции зерен исследуемых порошков показали, что для порошка из композиционного материала характерно повышенное количество зерен с проекцией в форме квадрата и прямоугольника и уменьшенное количество зерен с проекцией в форме трапеции и треугольника (рис. 2).

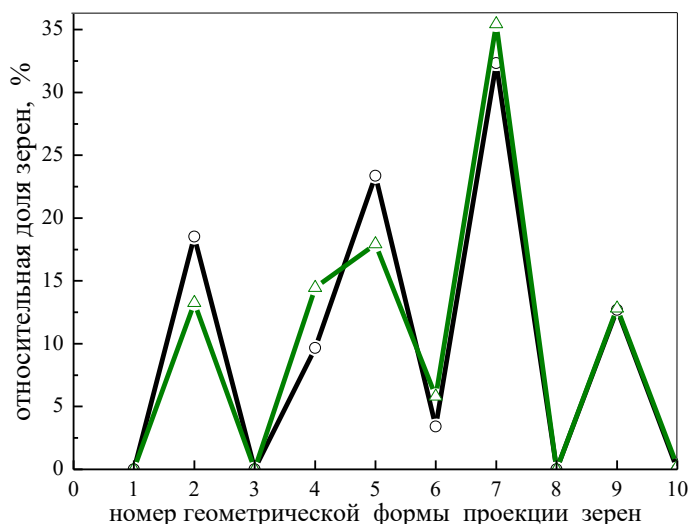


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения зерен порошков AC6 160/125 (Δ) и K 160/125 (○) по базовым формам проекции зерен (1 – овалоподобные фигуры (окружность и эллипс); 2 – прямоугольник; 3 – ромб; 4 – трапеция; 5 – квадрат; 6 – правильный пятиугольник; 7 – правильный шестиугольник; 8 – правильный восьмиугольник; 9 – треугольник; 10 – параллелограмм)

100 %-ной относительной концентрации порошка в рабочем слое: круги на основе стандартного шлифпорошка AC6 125/100; круги на основе компактов, полученных из стандартного шлифпорошка AC6 125/100 и субмикронных фракций порошков природного алмаза в равных пропорциях (условная марка компактов – К). Зернистость этих компактов –

Логично предположить, что выявленный характер распределения зерен по форме проекции одновременно с более развитой поверхностью зерен будет содействовать повышению прочности удержания зерен этих шлифпорошков в связке и снижению статической электризации в процессе обработки.

Также были исследованы морфометрические характеристики порошков, изготовленных из композиционных материалов на основе AC6 160/125, KM 3/2, карбида бора (B_4C ($B_{13}C_2$)), структурированных углеродной связкой, и порошков на основе дробленого киборита [22]. Результаты исследований показали увеличение режущих кромок в 2,0–2,5 раза и уменьшение угла заострения на 15–20 %.

Были изучены особенности шлифования твердого сплава ВК6 шлифовальными кругами формы 12A2-45° типоразмера 125×5×3×32 на полимерном связующем В2-08 при

160/125 (рис. 1). Шлифование проводилось на модернизированном универсально-заточном станке 3В642 при различной производительности обработки без охлаждения.

После обработки с помощью профилометра-профилографа модели SurfTest SJ-201 были определены параметры шероховатости обработанной поверхности, а также рассчитан линейным методом относительный расход зерен порошка из СТМ (в соответствии с ГОСТ 16181-82).

При невысокой производительности шлифования ($200\text{--}300\text{ мм}^3/\text{мин}$) шероховатость обработанной поверхности остается такой же, как при обработке стандартными алмазными кругами, а при более высокой производительности шероховатость несколько повышается.

Таким образом, для повышения износостойкости шлифовальных кругов и качества обработанной поверхности детали в целом при шлифовании твердого сплава ВК6 целесообразно применять круги с рабочим слоем, состоящим из смеси алмазов и компактов К (50 : 50) на основе мелкодисперсного порошка природных алмазов. Износостойкость таких кругов при высоких производительностях обработки в сравнении со стандартным инструментом повышается более чем в 3 раза. Работоспособность кругов с рабочим слоем из композиционных порошков на основе АС6 160/125 и микропорошков природного алмаза, КМ 3/2, дробленого киборита, карбида бора ($\text{В}_4\text{С} - \text{В}_{13}\text{С}_2$), структурированных углеродной связкой, повышается в 2–3 раза.

Выводы

1. Проанализированы особенности получения при высоких и низких давлениях композиционных и поликристаллических порошков на основе синтетического и природного алмаза, КНБ и карбида бора.

2. Исследована форма проекции и режущих кромок шлифпорошков АС6 160/125 и К 160/125 и композиционных порошков на основе АС6 160/125, КМ 3/2, карбида бора ($\text{В}_4\text{С} - \text{В}_{13}\text{С}_2$), структурированных углеродной связкой, и порошков на основе дробленого киборита. Результаты сравнительного анализа показали, что для порошка из композиционного материала характерно повышенное количество режущих кромок – в 2,0–2,5 раза и уменьшение угла заострения – на 15–20 %, повышенное количество зерен с проекцией в форме квадрата (более 15 %) и прямоугольника (более 20 %) и уменьшенное количество зерен с проекцией в форме трапеции и треугольника. Преобладающее количество зерен с проекцией в форме квадрата и прямоугольника при более развитой поверхности зерен будет содействовать улучшению прочности удержания зерен шлифпорошков в связке.

3. Проведены испытания шлифовальных кругов с режущим слоем из композиционных шлифпорошков. Износостойкость таких кругов при высоких производительностях обработки при шлифовании твердого сплава ВК8 в сравнении со стандартным инструментом повышается более чем в 3 раза.

4. Имеющиеся научно-методическое обеспечение и технические средства позволяют получать композиционные шлифпорошки на основе СТМ, целенаправленно изменять морфометрические характеристики и технологические свойства, как на стадии изготовления, так и в процессе модификации изготовленных шлифпорошков.

5. Необходимо продолжать работы по созданию порошков, изготовленных из композиционных и поликристаллических материалов, полученных различными методами; исследовать свойства порошков и испытывать порошки в абразивном инструменте.

Розглянуто особливості отримання композиційних та полікристалічних порошкових матеріалів на основі надтвердих матеріалів (НТМ) при високих та низьких тисках; зокрема описано метод виготовлення порошків, вироблених з композиційних матеріалів з вуглецевою зв'язкою. Наведено результати порівняльних досліджень форми проекції та характеристик різальних кромки зерен абразивних порошків. Встановлено, що з використанням цих порошків у шліфувальному інструменті ефективність застосування інструменту підвищується у 2–3 рази.

Ключові слова: порошки синтетичного алмазу, мікропорошки природного алмазу, порошки кубічного нітриду бору, порошки карбиду бору, вуглецева зв'язка, компакти, композиційні порошки, шліфпорошки.

COMPOSITE AND POLYCRYSTALLINE POWDER MATERIALS OF SYNTHETIC AND NATURAL DIAMONDS, CUBIC BORON NITRIDE AND BORON CARBIDE. A COMPARATIVE STUDY OF FORMS OF PROJECTION AND THE CHARACTERISTICS OF THE CUTTING EDGES OF GRAINS POWDER FOR GRINDING TOOLS

The peculiarities of technology of production of composite and polycrystalline powder materials based on superhard materials (SHM) at high and low pressures are considered, specifically the method of production of powders constructed of composite materials with carbon binder is described. The results of comparative studies of the projection form and characteristics of the cutting edges of grains of abrasive powders are presented. It was ascertained that the use of these powders in grinding tools results in increasing the effectiveness of the instrument by 2–3 times.

Keywords: synthetic diamond powders, natural diamond micron powders, cubic boron nitride powders, boron carbide powders, carbon binder, compacts, composite powders, grinding powders.

Литература

1. А. с. 803316 СССР, С01 В 31/06. Способ получения поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора / Д. В. Федосеев, Б. В. Дерягин, В. Н. Бакуль и др. – Оpubл. 08.10.80.
2. Поликристаллические материалы на основе алмаза / А. А. Шульженко, В. Г. Гаргин, В. А. Шишкин, А. А. Бочечка. Отв. ред. Н. В. Новиков. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
3. Получение и исследование зерен из композиционного материала алмаз–карбид кремния / С. К. Гордеев, С. Г. Жуков, Н. В. Новиков и др. // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 9–14.
4. Получение, физико-механические и эксплуатационные свойства карбонита / Н. В. Новиков, Д. В. Федосеев, Ю. И. Никитин и др. // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 4. – С. 3–6.
5. Ножкина А. В., Лаптев А. И., Ермолаев А. А. Влияние условий получения поликристаллических алмазов карбонадо на их прочностные свойства // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 5. – С. 36–39.
6. Сверхтвердый углеродный композиционный материал. / Е. П. Смирнов, С. К. Гордеев, Ю. И. Никитин и др. // ДАН СССР. – 1984. – 274. – № 4. – С. 887–889.
7. Беженарь Н. П., Бочечка А. А. Спекание порошков алмаза и кубического нитрида бора при высоких статических давлениях / Получение и применение сверхтвердых материалов. – К., 1986. – С. 5–10.
8. Целенаправленное получение композиционных алмазных материалов с углеродной связкой и дифференцированными свойствами / Н. В. Новиков, Ю. И. Никитин, В. Г. Полторацкий и др. // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 3. – С. 13–19.
9. Пат. 70817 А Україна, МПК С01В31/06, В24Д3/00. Спосіб виготовлення композиційного алмазовмісного матеріалу / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова и др. – Заявл. 30.12.03; опубл. 15.10.04; Бюл. № 10.

10. Пат. 70818А Україна, МПК В24D9/00. Спосіб виготовлення гранулята порошоків надтвердих матеріалів / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова и др. – Заявл. 30.12.03; опубл. 15.10.04; бюл. № 10.
11. Алмазосодержащие абразивные композиты на основе поли-меров, способных к самоорганизации / Е. А. Пашенко, А. Н. Черненко, О. В. Лажевская и др. // Породоразрушающий и металл-обрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 14. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – С. 402–408.
12. Новиков Н.В., Никитин Ю.И., Полторацкий В.Г., Гордеев С.К. Нитевидные углеродные кристаллы. // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 2. – С. 40–46.
13. Новый абразивный композиционный материала на основе микро-порошков кубонита, полученный при низких давлениях / Г. П. Богатырева, Ю. И. Никитин, В. И. Лавриненко и др. // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. науч. тр. ; Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины; редкол. Новиков Н.В. (глав. ред.) – К.: Логос, 2010. – С. 121–129.
14. Никитин Ю.И., Полторацкий В.Г., Лысенко А.В., Свирид А.А. О структуре и свойствах поликристаллических алмазов, полученных при низких давлениях и высоких температурах // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 5. – С. 27–29.
15. Богатырева Г.П., Никитин Ю.И., Полторацкий В.Г., Маринич М.А. Получение физико-химическим синтезом композиционного материала на основе нанодисперсных алмазов / Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. науч. тр. Отв. ред. Новиков Н.В. / Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – К., 2005. – С. 142–147.
16. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. – Введ. 01.01.1996. – К.: Держстандарт України, 1995.– 71 с.
17. DiaInspect / DiaInspect.OSM operating manual. – Режим доступа: <http://www.vdiamant.de/English/download.htm>
18. Новый композиционный абразивный материал на основе невостребованных мелкодисперсных микропорошков природного алмаза и шлифпорошков синтетического алмаза: получение и применение / В. Г. Полторацкий, В. И. Лавриненко, М. Н. Сафонова и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 18. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2015. - С. 354–360.
19. Петасюк Г.А. Інтерпретаційні і прикладні аспекти деяких морфологічних характеристик порошоків надтвердих матеріалів // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 2. – С. 80–95.
20. Petasyuk G.A. System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection // Powder Technology. – 2014. – V. 264. – p. 78–85.
21. Петасюк Г.А. Системно-аналоговий метод ідентифікації геометричної форми проєкції зерен абразивних порошоків // Сверхтвердые материалы. – 2016. – № 3.
22. Особенности использования дробленого киборита в абразивных композитах / В. И. Лавриненко, Ю. И. Никитин, О. О. Пасичный и др. // Породоразрушающий и металлообра-батывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 14. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – С. 511–515.

Поступила 27.04.16