

инструмента, особенно из синтетических алмазных материалов, которые имеют низкие температуры разупрочнения.

Выводы

1. Обоснована перспективность использования высоких давлений для изготовления алмазного инструмента.

2. Теоретический анализ механизма закрепления алмазного зерна в связке алмазного инструмента подтверждает, что применение высоких давлений приводит к его дополнительному механическому закреплению за счет различия коэффициентов термического расширения алмаза и металлокерамической связки.

Литература

1. Верещагин Л. Ф., Коняев Ю. С., Довбня А. В. Термостойкость поликристаллических образований алмаза и бора при давлении до 50 кбар в условиях их спекания с металлокерамическими связками // Алмазы. – 1970. – № 4. – С. 1–5.
2. Юрченко О. С. Исследование устойчивости железа и никеля при нагреве в контакте с тугоплавкими соединениями // Порошковая металлургия. – 1971. – № 1. – С. 45–49.
3. Бугаков В. И. Термостойкость алмазных материалов // Изв. ВУЗов. Цвет. металлургия. – 2005. – № 5. – С. 25–28.

Поступила 05.06.09

УДК 621.921.34-2:622.24.05

Г. П. Богатырева, д-р техн. наук, **Г. Д. Ильницкая**, **Г. А. Петасюк**,
Р. К. Богданов, **А. М. Исонкин**, **А. П. Закора**, кандидаты технических наук

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛМАЗНЫХ ШЛИФПОРОШКОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Results of research of influence of physicomachanical properties of diamond powders on operational characteristics of the drill bits are considered. Essential influence durability characteristics of grains of synthetic diamonds on working capacity of the drill bits is experimentally confirmed. Analytical dependence of influence of physicomachanical properties of synthetic diamonds on working capacity of diamond drill bits is received.

Введение.

Современная тенденция развития процесса бурения горных пород заключается во все более широком использовании для оснащения бурового геологоразведочного инструмента синтетических алмазов. При этом работоспособность инструмента существенно зависит от качества применяемых алмазов. В результате совершенствования процесса синтеза ведущими зарубежными фирмами получены высокопрочные алмазы, из которых могут изготавливаться высокопрочные порошки синтетического алмаза марок AC200 – AC400 [1].

Результаты исследований свидетельствуют, что серийные высокопрочные алмазные шлифпорошки, синтезированные в разных ростовых системах, как правило, неоднородны по

характеристикам качества, влияющим на физико-механические свойства кристаллов алмаза. Для получения однородных по прочностным характеристикам порошков требуется специальная их сортировка по содержанию примесей и шероховатости поверхности [2]. При этом показано, что разработанный ранее способ адгезионно-магнитной сортировки по этим характеристикам алмазов, синтезированных в системе Ni–Mn–C, неэффективен для сортировки алмазов, синтезированных в присутствии ферромагнитных сплавов Fe–Ni, Fe–Co. В ИСМ НАН Украины был разработан адгезионно-электростатический метод сортировки, обеспечивающий наряду с магнитной сепарацией эффективное разделение шлифпорошков по содержанию примесей и степени шероховатости поверхности, обеспечивающее получение порошков с заданным уровнем однородности порошков по прочности от 18 до 60% [3].

С учетом изложенного цель настоящей работы состоит в исследовании влияния физико-механических свойств алмазных шлифпорошков на эксплуатационные характеристики бурового инструмента и установлении их аналитической взаимосвязи.

Методика экспериментов и исходные материалы

В экспериментах по изучению физико-механических свойств алмазных порошков на эксплуатационные характеристики бурового инструмента использовались опытные буровые коронки БС-54. Для обеспечения чистоты экспериментов все опытные коронки БС-54 диаметром 76 мм конструктивно и технологически выполняли одинаковыми – двенадцатисекторными с плоским рабочим торцом и высотой алмазоносного слоя 6 мм. Матрицу опытных коронок выполняли из материала на основе пропитанной медью вольфрамо-кобальтовой смеси ВК6,

В качестве исходного материала для получения однородных по прочности высокопрочных шлифпорошков алмаза использовали алмазы, синтезированные в системе Fe–Ni–C, марки АС160Т и зернистостью 455/400 и 355/300 мкм. Шлифпорошки алмазов двух зернистостей сортировкой разделяли по дефектности поверхности на шесть продуктов [3]. Определяли статическую прочность полученных шлифпорошков, которую находили по разрушающей нагрузке на алмазные зерна P , Н [4, 5]. В порошках оценивали дефектность поверхности по коэффициенту поверхностной активности K_a [6, 7]. Термостабильность шлифпорошков оценивали по коэффициенту термостабильности $K_{тс}$ [8]. Кроме того, определяли состав шлифпорошков по прочности и рассчитывали коэффициент однородности по прочности $K_{одн}$ [9]. Эксплуатационные характеристики бурового инструмента оценивали по интенсивности изнашивания его породоразрушающих элементов (I , мм/м) как отношение линейного износа по высоте к длине пути трения о горную породу, а также по удельной работе разрушения коростышевского гранита $A_{уд}$, Дж/м² [10].

Результаты

В процессе исследований рассортировали алмазные шлифпорошки, синтезированные в системе Fe–Ni–C, марки АС160Т зернистостью 455/400 и 355/300 мкм, которые соответствовали зернистостям соответственно 400/315 и 315/250 [5]. Порошки зернистостью 400/315 разделили на шесть различных по прочности продуктов, что обуславливалось различием степени поверхностной дефектности K_a , %. Изменения дефектности поверхности, прочности при статическом разрушении зерен алмаза, однородности по прочности и термостабильности для шести продуктов сортировки показаны на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что K_a повышается с увеличением номера продукта сортировки. Прочностные характеристики P , $K_{тс}$, и $K_{одн}$ порошков алмаза устойчиво снижаются от первого к шестому продукту. Следует отметить, что во всех полученных порошках коэффициент однородности по прочности увеличился в 3,4–5,4 раза по сравнению с исходным порошком. Аналогичные результаты разделения шлифпорошков по дефектности поверхности получены при сортировке порошков алмаза зернистостью 315/250.

Были изготовлены шесть групп опытных коронок типа БС54 диаметром 76 мм с использованием алмазов с разными прочностными характеристиками.

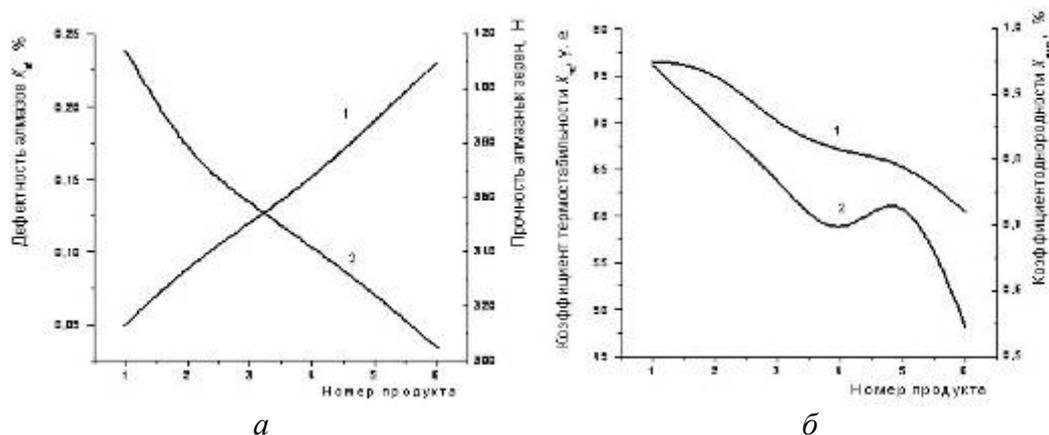


Рис. 1. Изменения дефектности поверхности (K_a %; а), кривая 1), прочности (P H; а), кривая 2) при статическом разрушении зерен, термостабильности (K_{mc} %; б), кривая 1) и однородности по прочности ($K_{одн}$ %; б), кривая 2) продуктов сортировки

Отработку указанных буровых коронок производили при бурении коростышевского гранита X категории буримости при частоте вращения $400\text{--}800\text{ мин}^{-1}$, наиболее широко применяемых при высокооборотной технологии алмазного бурения. Достигнутые в результате этого механические скорости бурения $1,5\text{--}4,8\text{ м/ч}$ соответствовали аналогичному показателю в производственных условиях. За счет поддержания постоянным углубления за оборот $63, 80$ и 100 мкм механические скорости бурения были одинаковы в рамках одного цикла опытов для всех шести групп экспериментальных коронок. Повышение углубления коронки за один оборот до 125 мкм на стадии предварительного цикла экспериментов приводило к переходу процесса бурения в "критический" режим, характеризующийся резким скачкообразным повышением затрачиваемой при бурении мощности и интенсивности изнашивания.

С учетом этого и руководствуясь вторым постулатом динамики изнашивания [11], который определяет, что при постоянстве внешних условий работы инструмента закон динамики его изнашивания не зависит от абсолютного значения нагрузок, абразивности твердых частиц, масштабного и других факторов. Исследования износостойкости буровых коронок проводили с поддержанием "нормального" режима бурения.

Результаты испытаний при разном углублении за один оборот показаны на рис. 2.

Результаты исследований (см. рис. 2) свидетельствуют об общей для всех коронок закономерности роста интенсивности изнашивания с увеличением частоты вращения и углубления коронки за оборот. С учетом того, что процесс разрушения горной породы происходил в нормальном режиме, интенсивность изнашивания коронок находится в линейной или близкой к ней зависимости от частоты вращения для всех значений углубления за оборот.

Следует отметить, что снижение прочности алмазов, используемых для оснащения опытных коронок, в $1,35$ раза, приводит к повышению интенсивности изнашивания инструмента в $1,52\text{--}1,81$ раза.

Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что наименьшую интенсивность изнашивания, т. е. наибольшую износостойкость, при любой частоте вращения коронок и их углублениях за оборот имеют коронки, оснащенные наиболее прочными и однородными зёрнами алмазов. При высокой частоте вращения с повышением прочности алмазов интенсивность изнашивания снижается в большей степени, чем при низкой.

По сравнению с частотой вращения такой фактор, как углубление коронки за оборот, приводит к более значительному изменению интенсивности изнашивания. Объясняется это тем, что увеличение объема разрушаемой горной породы вызывает повышение динамических нагрузок на рабочий торец инструмента, тем самым повышая силу трения о горную породу матрицы и располагающихся на ее рабочем торце алмазов.

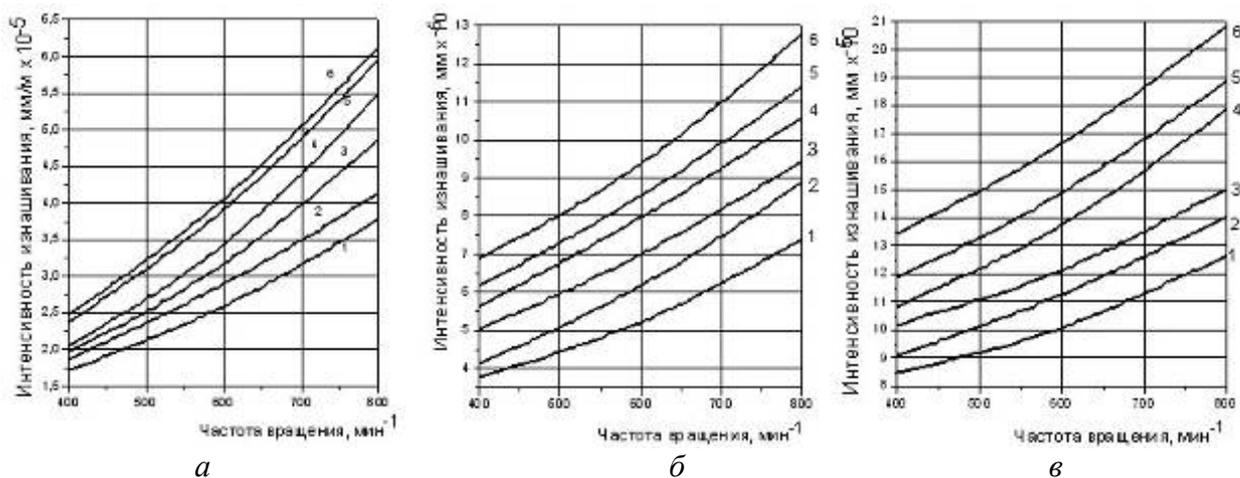


Рис. 2. Зависимости интенсивности изнашивания от частоты вращения коронок БС54 диаметром 76 мм, оснащенных алмазами с различными физико-механическими свойствами, при углублении за один оборот: а – 63 мкм; б – 80 мкм; в – 100 мкм. Цифры – номера продуктов

Можно предположить, что соответствие приведенных зависимостей определяется соотношением затрат мощности на разрушение горной породы и трение об нее коронки. Об этом свидетельствует энергоёмкость процесса разрушения горной породы (рис. 3).

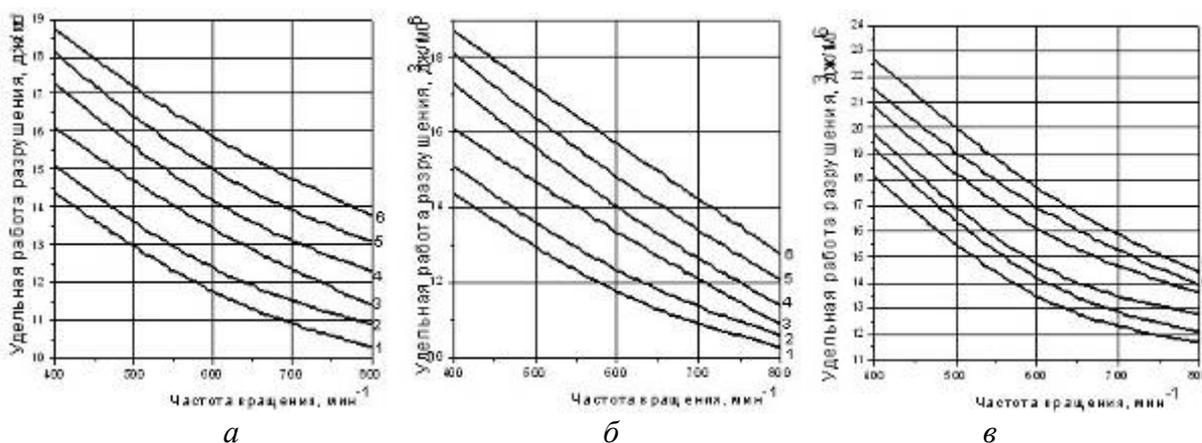


Рис. 3. Зависимости удельной работы разрушения от частоты вращения буровой коронки БС54, оснащенной алмазами с разными физико-механическими свойствами, при углублении за один оборот: а – 63 мкм; б – 80 мкм; в – 100 мкм. Цифры – номера продуктов

Сравнительный анализ данных об энергоёмкости разрушения (рис. 3) показывает обратно пропорциональную зависимость удельной работы разрушения коростышевского гранита опытными коронками от прочности используемых для их оснащения алмазов. При этом следует отметить, что коронки БС-54, оснащенные наиболее прочными и однородными по прочности зерен алмазами (продукт 1 на рис. 3), имеют наименьшую удельную объемную работу разрушения. При равенстве для всех коронок (в пределах одного опыта) объема разрушаемой горной породы это свидетельствует о более эффективном использовании ими энергии, подводимой к забою скважины.

С увеличением прочности используемых алмазов в 1,35 раза на всех исследуемых режимах бурения удельная объемная работа разрушения снижается в 1,23–1,42 раза.

С учетом изложенного выявляли закономерность и аналитически описывали взаимосвязь физико-механических свойств алмазных шлифпорошков с работоспособностью бурового инструмента, которую оценивали по величине проходки на коронку.

В процессе исследований установили оптимальную структуру совокупности характеристик для выбора их в качестве независимых факторов процесса. На основании анализа экспериментальных данных в качестве независимых факторов изучаемого процесса выбирали статическую прочность алмазных шлифпорошков P , их однородность по прочности $K_{одн.}$, термостабильность $K_{тс}$ и твердость буримой породы по штампу $P_{шт.}$. Зависимым фактором взяли глубину проходки L бурового инструмента. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице (графы 2-6). В соответствии с методикой построения эмпирической математической модели независимые факторы имеют статус независимых переменных (x_1, x_2, x_3, x_4), зависимый фактор – статус зависимой переменной (y).

Для математической обработки экспериментальных данных использовали созданную в ИСМ НАН Украины компьютерную программную систему автоматизированного построения и анализа многофакторных эмпирических математических моделей LrAprox [12]. Основу этой программной системы составляет оригинальный алгоритм автоматической генерации аппроксимирующих зависимостей для их использования в качестве эмпирических математических моделей. Определение рабочих параметров синтезируемых моделей основано на использовании минимизационной процедуры метода наименьших квадратов [13].

Теоретическую адекватность полученных эмпирических математических моделей оценивали по минимуму среднелинейному (по абсолютной величине Δ_{min}^c) отклонению расчетных значений зависимой переменной от фактических на множестве проанализированных моделей и по максимальному его значению для того варианта, на котором достигается Δ_{min}^c . Показателями адекватности моделей принимали также надежность n и тенденцию прогнозирования t (t^+ – к завышению, t^- – к занижению) [13].

Таблица 1. Экспериментальные данные для построения эмпирической математической модели и результаты проверки на этих данных

№ п/п	Независимые факторы				Зависимый фактор		
	x_1	x_2	x_3	x_4	Проходка на коронку L , м		
	P	$K_{одн.}, \%$	$K_{тс}$	$P_{шт.},$ кГс/мм ²	$L_{эксп}$	$L_{расч}$	$\Delta_L, \%$
	2	3	4	5	6	7	8
1	349	82	0,960	450	21,30	21,32	0,08
2	336	74	0,950	450	18,40	18,395	0,03
3	312	58	0,900	450	16,20	16,18	0,13
4	288	70	0,860	450	15,00	14,79	1,38
5	276	56	0,850	450	13,40	13,06	2,53
6	259	40	0,790	450	11,30	11,74	3,89
7	349	82	0,960	415	38,20	38,11	0,23
8	336	74	0,950	415	29,60	29,68	0,27
9	312	58	0,900	415	24,30	24,31	0,04
10	288	70	0,860	415	20,80	21,31	2,45
11	276	56	0,850	415	17,40	17,89	2,83
12	259	40	0,790	415	16,30	15,50	4,90

Числовые значения критериев адекватности рассчитывали по совокупности полученных экспериментальных данных после определения рабочих параметров модели.

Система позволяет проводить строить эмпирические математические моделей с количеством независимых факторов, не более восьми. Как показали результаты исследования [14], разработанная система LrAprox дает возможность получать более адекватные модели по

сравнению с известными профессиональными пакетами аналогичного назначения (например, программным средством STATISTICA 5.5).

На основании экспериментальных данных получили следующую наиболее адекватную аналитическую зависимость влияния статической прочности алмазных шлифпорошков, их однородности по прочности, термостабильности и твердости буримой породы на глубину проходки бурового инструмента:

$$L = \frac{10}{a_0 - a_1\sqrt{P} + a_2\sqrt{K_{одн}} - a_3K_t^{1,5} + \frac{a_4}{\sqrt{PK_{одн}}} - \frac{a_5}{\sqrt{PK_{тс}}} + a_6\sqrt{P_{шт}}}, \quad (1)$$

где a_0, \dots, a_6 – рабочие параметры модели (эмпирические коэффициенты), $a_0 = 61,15427$; $a_1 = 2,28912$, $a_2 = 1,51044$, $a_3 = 10,31485$, $a_4 = 1638,374$, $a_5 = 673,4339$, $a_6 = 0,24562$.

Всего было проанализировали 497664 аппроксимирующих зависимостей. Показатели адекватности модели $\Delta_{\min}^c = 1,56\%$, $\Delta_{\max} = 4,90\%$, $n = 100\%$, $t^+ = 46,7\%$, $t^- = 53,3\%$. Результаты расчета проходки по формуле (1) приведены в таблице (графы 6, 7; $L_{\text{эсп}}$ – экспериментальные данные; $L_{\text{расч}}$ – расчетные; Δ_s – погрешность расчетного определения).

Исходя из анализа результатов расчетной проходки на коронку (см. таблицу) по полученной эмпирической аналитической зависимости (1) приходим к следующим выводам. При средней погрешности прогнозирования 1,56 % максимальное ее значение не превышает 5 %. Причем, в большинстве случаев погрешность прогнозирования намного меньше максимального ее значения. Так, из общего количества эмпирических данных (12 наборов) только в двух случаях (16,7 %) погрешность превышает 3 %, в трех случаях (25 %) – 2 %. Надежность модели (1), выражающаяся в относительном количестве случаев, когда погрешность не превышает допустимые 5 %, составляет 100 %.

Таким образом, полученную эмпирическую зависимость с учетом высокую степени ее адекватности, можно использовать для прогнозной оценки проходки на коронку в зависимости от характеристик используемого при ее изготовлении алмазного шлифпорошка.

Выводы

1. В результате сортировки высокопрочных алмазов марки AC160 зернистостью 400/315 и 315/250, полученных в присутствии сплава-растворителя Fe–Ni, изготовлена опытная партия алмазных шлифпорошков, различающихся степенью дефектности их поверхности, термостабильностью по прочности и однородностью. Во всех полученных порошках коэффициент однородности по прочности увеличился в 2,2–5,4 раза по сравнению с исходными порошками.

2. Показано существенное влияние прочностных характеристик алмазных порошков на работоспособность бурового инструмента (интенсивность изнашивания при различных режимах работы, энергоемкость разрушения горной породы).

3. Получена аналитическая зависимость влияния физико-механических свойств зерен алмазов на работоспособность алмазных буровых коронок.

Литература

1. Влияние качественных характеристик высокопрочных алмазов на работоспособность бурового инструмента / Н. В. Новиков, Г. П. Богатырева, Р. К. Богданов и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. К.: ИСМ НАН Украины. – 2007. – Вып. 10. – С. 160–168.
2. Ильницкая Г. Д., Богатырева Г. П., Невструев Г.Ф. Получение высококачественных алмазных шлифпорошков // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ НАН Украины, 2005. – С. 63 – 71.

3. Пат. 25515 України, МПК В03С 7/00, В03С 1/00. Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен / М.В. Новіков, Г.П. Богатирьова, Г.Д. Ільницька, Г.Ф. Невструєв.– № 200703803; Заяв. 05.04.07; Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
4. ДСТУ 329295. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 72 с.
5. ТУ У 28.4–05417344–075-2003. Шлифпорошки синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. К.: Госстандарт Украины, 2003. – 10 с.
6. Ільницька Г. Д. Оцінка дефектності поверхні алмазов по адгезійним свойствам // Фізико-хімічні свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа. – К.: ИСМ НАН України, 1987. - С. 33 – 39.
7. Пат. 65129 А України, МКИ G01N27/12. Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г. Ф. Невструєв, Г. Д. Ільницька. – № 2003065196;
8. Заявл. 05.06.03, Опубл. 15.03.04, Бюл. № 3.
9. СТП 28.5-05417377. Метод определения коэффициента термостойкости шлифпорошков сверхтвердых материалов. К.: ИСМ НАН України, 2004. – 12 с.
10. Оцінка прочностних характеристик алмазних порошків для бурового інструмента / Г. П. Богатырева, В. И. Куш., Г. Д. Ільницька, Г. Ф. Невструєв, Р. К. Богданов, А. М. Ісонкін, А. П. Загора, І. Н. Зайцева / Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 26 – 41.
11. П.В. Зыбинский, Богданов Р.К., Ісонкін А.М. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: Моногр.– Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
12. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В.Н. Бакуля.– К.: Наук. думка, 1978.– 232 с.
13. Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LgArгох для применения в научно–прикладных задачах материаловедения // Порошковая металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр.– Минск, 2008,– Вып. 31.– С. 58–63.
14. Бахвалов Н. С. Численные методы.– М.: Наука, 1973.– 632 с.
15. Петасюк Г. А. Сравнительные возможности программных средств аналитического описания экспериментальных данных в задачах диагностики свойств дисперсных материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. –К.: ИСМ НАН України.– 2008. – Вып. 11. – С. 231 – 237.

Поступила 12.06.09

УДК 621.921.34-492.2

Г. А. Петасюк, Ю. И. Никитин, кандидаты технических наук

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ АБРАЗИВНОЙ СПОСОБНОСТИ
МИКРОПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА И ШЕРОХОВАТОСТИ
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЗЕРНОВЫМ СОСТАВОМ
И СРЕДНИМ РАЗМЕРОМ ЗЕРЕН ФРАКЦИЙ**

Experimental research of effect of grain composition indices of synthetic diamond micron powders on abrasive ability of the powders and roughness of finished surface has been carried out.