

УДК 621.921.34

Н. В. Новиков, Г. П. Богатырева, Г. Д. Ильницкая,
Г. А. Петасюк, А. М. Исонкин, И. Н. Зайцева (г. Киев)

**Влияние однородности шлифпорошков
синтетического алмаза
на работоспособность бурового
инструмента**

Показано, что сортировка по степени дефектности и дополнительная классификация с выделением узких фракций зернистостей 400/355 и 250/220 алмазных порошков с магнитными свойствами, полученных из алмазов, синтезированных в присутствии феррокобальта, позволили получить элитные алмазные порошки марок АС160-Э–АС65-Э с высокой однородностью по прочностным и геометрическим характеристикам. Оснащение буровых коронок такими порошками позволяет повысить работоспособность инструмента при бурении крепких горных пород. Установлено, что с повышением прочности порошков марок АС160-Э–АС65-Э и их однородности по прочности в совокупности с увеличением однородности по линейным размерам интенсивность изнашивания коронок снижается.

Ключевые слова: алмазные порошки, степень дефектности, однородность, прочность, интенсивность изнашивания.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность алмазного инструмента в значительной мере определяется свойствами алмазных порошков, которые в свою очередь, обуславливаются технологиями синтеза, извлечения, обработки, классификации по размерам и форме, сортировки по физико-химическим свойствам, обеспечивающих получение порошков с заданными характеристиками. Исходя из требований, предъявляемых к буровому инструменту, основными характеристиками качества алмазного порошка являются крупность в виде зернистости и зернового состава, прочность, термостабильность и однородность порошка по прочностным и геометрическим характеристикам (линейным размерам алмазных зерен). Порошки синтетического алмаза, имеющие высокую однородность по прочности, линейным размерам и высокую термостабильность, относятся к разряду элитных порошков.

Однородность является важной характеристикой порошков сверхтвердых материалов, позволяющей объективно отражать их качество. В настоящее время возрастает интерес к алмазным порошкам, однородным по различным технологическим характеристикам. В Институте сверхтвердых материалов НАН Украины разработан ряд нормативных документов [1–4], позволяющих оценивать однородность шлифпорошков по основным технологическим характеристикам алмазных зерен, прежде всего, по прочностным и геометрическим.

При бурении скважин породоразрушающим инструментом основным видом износа алмазных зерен является хрупкое разрушение отдельных выступающих частей вследствие развития микротрещин при контакте с породой.

© Н. В. НОВИКОВ, Г. П. БОГАТЫРЕВА, Г. Д. ИЛЬНИЦКАЯ, Г. А. ПЕТАСЮК, А. М. ИСОНКИН,
И. Н. ЗАЙЦЕВА, 2012

Важным фактором, способствующим эффективному разрушению горной породы и выносу из призабойной зоны шлама, является высота выступания алмазных зерен из матрицы буровой коронки. В процессе бурения прилагаемая к алмазной импрегнированной коронке осевая нагрузка распределяется не равномерно по всей площади поверхности алмазосодержащей матрицы, а перераспределяется между алмазными зернами, наиболее выступающими из поверхности матрицы. Учитывая, что характер распределения высоты выступания алмазных зерен из тела матрицы соответствует характеру распределения осевых усилий, передаваемых на них в процессе бурения, зерна с наибольшей высотой выступания нагружаются в десятки раз больше и мгновенно разрушаются. Уменьшить усилие на алмазные зерна можно, обеспечивая равную высоту их выступания из тела матрицы за счет использования однородных по прочности и линейным размерам зерен [5, 6]. Одним из важнейших способов увеличения износостойкости алмазного инструмента для буровой и камнеобрабатывающей индустрии является повышение однородности природных и синтетических алмазных порошков по зерновому составу и прочности.

Целью данной работы было изучение влияния однородности алмазных порошков по прочностным и геометрическим характеристикам на работоспособность породоразрушающего инструмента при бурении крепких горных пород.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовали алмазные порошки, полученные из алмазов, синтезированных в системе Fe–Co–C. Алмазные шлифпорошки марок AC50 (зернистости 400/315) и AC80 (зернистости 250/200) разделяли по дефектности поверхности на несколько групп [7–9]. Затем определяли коэффициент поверхностной активности K_a алмазных зерен в полученных продуктах разделения [10]. Прочностные характеристики алмазных шлифпорошков оценивали по показателю статической прочности P [11], термостабильность – по коэффициенту термостабильности $K_{тс}$ [12]. Кроме того, производили распределение шлифпорошков по прочности и линейным размерам единичных зерен и рассчитывали коэффициенты однородности по прочности $K_{одн.пр}$ и по линейным размерам $K_{одн.л.р}$ [2, 3]. По разработанным техническим условиям [13] определяли марки алмазных порошков.

Алмазные порошки после сортировки были использованы для изготовления буровых коронок. Эксплуатационные характеристики бурового инструмента при лабораторных испытаниях определяли по разработанным критериям оценки при бурении горных пород [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После адгезионно-магнитной сортировки алмазные порошки зернистости 400/315 и 250/200 разделили на шесть групп, различающихся по дефектности поверхности K_a : для зернистости 400/315 – от 0,11 до 3,24 %, а для зернистости 250/200 – от 0,05 до 1,11 %. Полученные продукты сортировки для выделения порошков, однородных по линейным размерам, дополнительно классифицировали на ситах ряда R-20 и выделяли узкие фракции зернистостей 400/355 и 250/220, а также разделяли по форме зерен на вибрационной установке [15, 16]. В полученных после сортировки порошках определяли следующие характеристики: P , $K_{тс}$, $K_{одн.пр}$ и $K_{одн.л.р}$ (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика алмазных порошков после сортировки

Продукт разделения	P, H	$K_{тс}, \text{ усл. ед.}$	$K_{одн.пр}, \%$	$K_{одн.л.р}, \%$	Марка
400/315					
1	288,5	0,95	76	77	АС160-Э
2	181,0	0,94	70	74	АС100-Э
3	139,0	0,85	65	72	АС80-Э
4	111,8	0,81	64	70	АС65-Э
5	59,5	0,80	56	37	АС50
6	39,8	0,72	48	–	АС20
Исходный	78,8	0,82	14	22	АС50
250/200					
1	165	91	75	75	АС125-Э
2	127	78	74	72	АС100-Э
3	107	72	68	70	АС80-Э
4	83	70	54	65	АС65-Э
5	68	67	51	41	АС50
6	33	–	–	–	АС20
Исходный	95	75	23	24	АС80

Как следует из табл. 1, в результате проведенной сортировки получены элитные шлифпорошки марок АС160-Э, АС100-Э, АС80-Э и АС65-Э зернистости 400/315 и АС125-Э, АС100-Э, АС80-Э и АС65-Э зернистости 250/200, с использованием которых были изготовлены буровые коронки для лабораторных испытаний. Испытания проводили при бурении коростышевского гранита с частотой вращения бура 800 мин^{-1} и подачей 63 мкм за оборот. Работоспособность буровых коронок оценивали по интенсивности I изнашивания коронок. Также изучали состояние алмазных зерен на рабочем торце инструмента, которое оценивали по среднему значению высоты h_v выступания зерен из матрицы (табл. 2).

Таблица 2. Результаты лабораторных испытаний буровых коронок, оснащенных элитными алмазными порошками

Зернистость	Марка	$h_v, \text{ мкм}$	$I, \text{ мм/м}$
400/315	АС160-Э	75,3	0,143
	АС100-Э	71,4	0,164
	АС80-Э	67,2	0,186
	АС65-Э	64,7	0,202
	АС50 исходные	57,3	0,234
	АС125-Э	67,8	0,156
250/200	АС100-Э	65,2	0,195
	АС80-Э	59,7	0,216
	АС65-Э	54,4	0,249
	АС80 исходные	53,7	0,254

Данные испытаний (см. табл. 2) показывают, что оснащение буровых коронок алмазными порошками с высоким коэффициентом однородности по прочности и линейным размерам позволяет повысить их работоспособность. Так, оснащение коронок алмазами марки АС80-Э зернистости 250/200 после сортировки по сравнению с исходными алмазными порошками этой же марки позволяет увеличить среднюю высоту выступания алмазных зерен из матрицы на 14,4 % и за счет уменьшения степени воздействия частиц шлама разрушенной породы на рабочий торец коронок снизить интенсивность их изнашивания на 13,3 %.

Как видно на рис. 1 и 2, с ростом однородности по прочности увеличивается средняя высота выступания алмазных зерен из матрицы. Интенсивность изнашивания коронок снижается с увеличением прочности и однородности по прочности алмазных порошков этих марок.

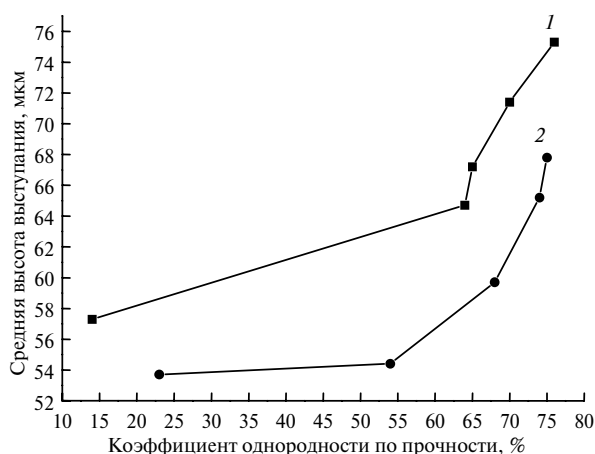


Рис. 1. Зависимость средней высоты выступания алмазных зерен из матрицы зернистостей 400/315 (1) и 250/200 (2) от их коэффициента однородности по прочности.

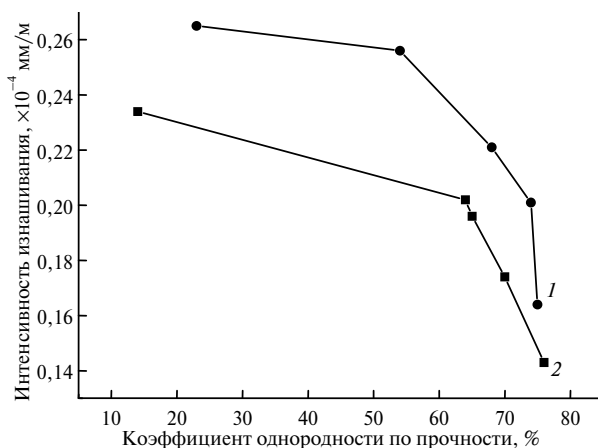


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания коронки, оснащенной элитными алмазными порошками зернистостей 400/315 (1) и 250/200 (2), от их коэффициента однородности по прочности.

Из данных рис. 3, 4 следует, что увеличение коэффициента однородности алмазных зерен по линейным размерам способствует росту их средней высоты выступания из матрицы, снижению вероятности расклинивания и пере-

драбливания частиц шлама под рабочим торцом и уменьшению сил трения. При этом количество алмазных зерен, активно вступающих в контакт с горной породой в одной линии резания, увеличивается, а удельная нагрузка на зерно уменьшается. Это приводит к снижению износа алмазосодержащей матрицы, что обеспечивает повышение работоспособности инструмента в целом.

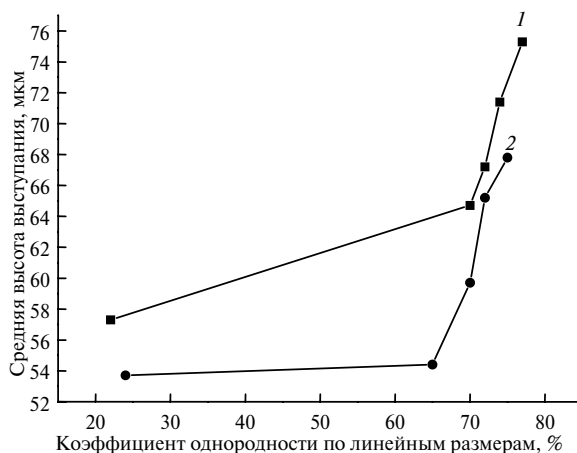


Рис. 3. Зависимость средней высоты выступания алмазных зерен из матрицы зернистостей 400/315 (1) и 250/200 (2) от их коэффициента однородности по линейным размерам.

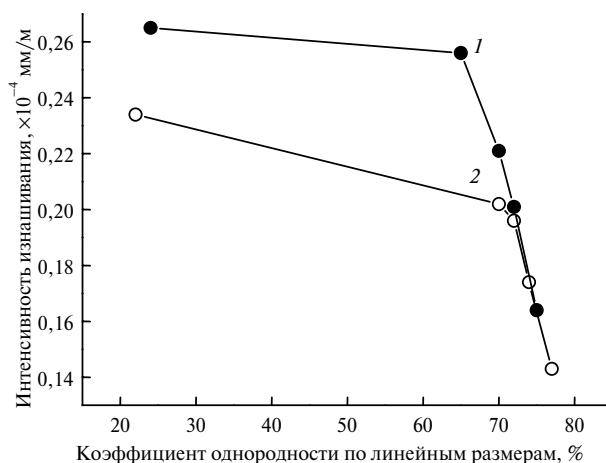


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания коронки, оснащенной элитными алмазными порошками зернистостей 400/315 (1) и 250/200 (2), от их коэффициента однородности по линейным размерам.

Таким образом, использование элитных алмазных порошков, однородных по прочностным и геометрическим характеристикам, позволяет повысить работоспособность породоразрушающего бурового инструмента.

Для дополнительной оценки влияния качества алмазных шлифпорошков на работоспособность бурового инструмента была проведена математическая обработка экспериментальных данных, которая включала анализ корреляции независимых факторов и каждого из зависимых и поиск наиболее адекватного аналитического описания их взаимосвязи. В качестве независимых факторов изучаемого процесса были приняты зернистость z алмазного порошка, прочность P алмазных зерен при статическом сжатии, коэффициенты их од-

нородности по прочности $K_{\text{одн.пр}}$ и линейным размерам $K_{\text{одн.л.р}}$. Зависимыми факторами были высота $h_{\text{в}}$ выступления алмазных зерен из матрицы и интенсивность I изнашивания коронки после 2 м проходки скважины. За показатель зернистости принимали среднее арифметическое для ячеек верхнего и нижнего сит, на которых была выделена основная фракция алмазного порошка. Так, если $z_{\text{в}}/z_{\text{н}}$ – зернистость порошка, то $z = (z_{\text{в}} + z_{\text{н}})/2$.

Результаты вычисления частных коэффициентов корреляции между высотой выступления зерен из матрицы и независимыми факторами, а также значение коэффициента множественной корреляции R совокупности этого зависимого и всех независимых факторов приведены в табл. 3. Аналогичная информация приведена для интенсивности изнашивания коронки.

Таблица 3. Значение коэффициентов корреляции между зависимым и независимыми факторами

Зависимый фактор	Коэффициент множественной корреляции R	Независимый фактор			
		z	P	$K_{\text{одн.пр}}$	$K_{\text{одн.л.р}}$
		Частный коэффициент корреляции			
$h_{\text{в}}$	0,9687	0,5122	0,8815	0,7356	0,7031
I	0,8983	-0,3847	-0,8648	-0,7558	-0,7125

Анализ данных табл. 3 показывает, что коэффициенты множественной корреляции совокупности исследуемых факторов как для высоты выступления зерен, так и для интенсивности изнашивания коронки достаточно высокие, т. е. существует объективная взаимосвязь между ними. Данный вывод подтверждается и величиной значений частных коэффициентов корреляции независимых факторов с каждым из зависимых. Наиболее высокие значения частных коэффициентов корреляции имеют место для прочности зерен при статическом сжатии и однородности порошка по прочности. Анализ знаков частных коэффициентов корреляции показывает, что высота выступления зерен из матрицы находится в прямой пропорциональной зависимости со всеми независимыми факторами (все знаки “+”). Это говорит о том, что с увеличением любого из независимых факторов высота выступления зерен также увеличивается. При этом наиболее существенное влияние на высоту выступления алмазных зерен оказывают их прочность при статическом сжатии и однородность порошка по прочности, так как частные коэффициенты корреляции для данных характеристик наиболее высокие. Для интенсивности изнашивания коронки имеет место обратно пропорциональная зависимость (все знаки “-”), т. е. с увеличением любого из независимых факторов интенсивность изнашивания уменьшается. При этом, как и в предыдущем случае, доминирующими факторами являются прочность зерен при статическом сжатии и однородность порошка по прочности.

Поиск наиболее адекватного аналитического описания взаимосвязи экспериментальных данных осуществляли с использованием пакета программ LrAprox [17], предназначенного для автоматизированного многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей. Основу этой программной системы составляет оригинальный алгоритм автоматической генерации аппроксимирующих зависимостей для использования их в качестве эмпирических математических моделей. Определение рабочих параметров

синтезируемых моделей основано на использовании минимизационной процедуры метода наименьших квадратов [18] к линейризованным аппроксимирующим зависимостям.

Теоретическую адекватность получаемых эмпирических математических моделей оценивали минимальным значением среднелинейного (по абсолютной величине) отклонения Δ_{\min}^c расчетных значений зависимой переменной от фактических. Наиболее адекватной из общего количества проанализированных моделей принимается та, которая обеспечивает наименьшее значение Δ_{\min}^c . Как показали проведенные исследования [17], разработанная программная система LrArgox дает возможность получать более адекватные модели по сравнению с известными профессиональными пакетами аналогичного назначения (например, пакетом STATISTICA 5.5).

В результате анализа 196608 аппроксимирующих зависимостей для высоты выступления зерен из матрицы наиболее адекватная эмпирическая математическая модель была получена в виде

$$h_b = 100 \left[a_0 + a_1 \lg(\tilde{z}) + a_2 \tilde{P} - \frac{a_3}{K_{\text{одн.л.р}}} + a_4 K_{\text{одн.л.р}} - a_5 \lg(\tilde{z}\tilde{P}) - a_6 \tilde{P} K_{\text{одн.л.р}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\tilde{z} = z/10$, $\tilde{P} = P/10$ – масштабированные значения показателей зернистости и статической прочности; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – рабочие параметры модели, являющиеся константами, которым, исходя из размерностей зависимого (h_b) и независимых (\tilde{z} , \tilde{P} , $K_{\text{одн.л.р}}$, $K_{\text{одн.л.р}}$) факторов, следует приписать соответствующие размерности (a_1 – безразмерный параметр). Данные параметры имеют следующие значения: $a_0 = 1,899$ мкм, $a_1 = 1,226$, $a_2 = 0,110$ мкм/Н, $a_3 = 1,746$ мкм, $a_4 = 0,004$ мкм, $a_5 = 1,926$ Н⁻¹, $a_6 = 0,095$ мкм/Н.

Для интенсивности изнашивания коронки в автоматическом режиме также было проанализировано 196608 аппроксимирующих зависимостей. Наиболее адекватная эмпирическая математическая модель была получена в виде

$$I = b_0 + \frac{b_1}{\tilde{z}} - b_2 \sqrt{\tilde{P}} - \frac{b_3}{\lg(K_{\text{одн.л.р}})} - b_4 K_{\text{одн.л.р}} + b_5 \tilde{z}\tilde{P} - b_6 \tilde{P} K_{\text{одн.л.р}}, \quad (2)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ – рабочие параметры модели, также являющиеся константами, которым, исходя из размерности I , \tilde{z} , \tilde{P} , $K_{\text{одн.л.р}}$, $K_{\text{одн.л.р}}$, следует приписать соответствующие размерности. Параметры имеют следующие значения: $b_0 = 0,542$ мм/м, $b_1 = 3,311$ мкм·мм/м, $b_2 = 0,116$ мкм·мм/м, $b_3 = 0,080$ мм/м, $b_4 = 0,001$ мм/м, $b_5 = 0,003$ мм/(м·мкм·Н), $b_6 = 0,001$ мм/(м·Н).

Сравнение результатов расчетного определения глубины проходки по зависимости (1) и интенсивности изнашивания коронки по зависимости (2) с экспериментальными данными (табл. 4) показывает, что среднее значение относительного отклонения расчетных данных от экспериментальных не превышает 0,5 %. При этом максимальное отклонение в обоих случаях не превышает 1 %.

ВЫВОДЫ

Сортировка алмазных порошков зернистости 400/315 и 250/200, синтезированных в присутствии феррокобальта, с ярко выраженными магнитными свойствами по степени дефектности и дополнительная классификация с выделением узких фракций зернистостей 400/355 и 250/220 позволили получить

элитные алмазные порошки марок АС160-Э–АС65-Э с высокой однородностью по прочности и геометрическим характеристикам.

Таблица 4. Результаты расчетного определения высота выступания зерен из матрицы и интенсивности изнашивания коронки

z, мкм	P, Н	K _{одн.пр}	K _{одн.л.р}	h _в , мкм		I, мм/м	
				расчетные	экспериментальные	расчетные	экспериментальные
357,5	288,5	76,0	77,00	75,308	75,3	0,14279	0,143
357,5	181,0	70,0	74,0	71,498	71,4	0,16520	0,164
357,5	139,0	65,0	72,0	67,031	67,2	0,18436	0,186
357,5	111,8	64,0	70,0	64,763	64,7	0,20264	0,202
357,5	78,8	14,0	22,0	57,307	57,3	0,23401	0,234
225,0	165,0	75,0	75,0	67,821	67,8	0,15629	0,156
225,0	127,0	74,0	72,0	64,739	65,2	0,19396	0,195
225,0	107,0	68,0	70,0	60,289	59,7	0,21687	0,216
225,0	83,0	54,0	65,0	54,225	54,4	0,24889	0,249
225,0	95,0	23,0	24,0	53,701	53,7	0,25399	0,254

Доминирующими факторами, способствующими увеличению высоты выступания алмазных зерен и снижению интенсивности изнашивания коронок, являются повышение прочности порошков марок АС160-Э–АС65 и их однородности по прочности в совокупности с увеличением однородности по линейным размерам.

Оснащение буровых коронок элитными алмазными порошками с высоким коэффициентом однородности по прочности и линейным размерам позволяет повысить работоспособность буровых коронок при бурении крепких горных пород.

Полученные эмпирические математические модели адекватно описывают зависимости высоты выступания алмазных зерен из матрицы буровой коронки и ее интенсивности изнашивания от прочности и однородности по прочности и линейным размерам зерен.

Показано, що сортування по мірі дефектності і додаткова класифікація з виділенням вузьких фракцій зернистостей 400/355 і 250/220 алмазних зерен з магнітними властивостями, отриманих з алмазів, синтезованих у присутності ферокобальту, дозволили отримати елітні алмазні порошки марок АС160-Е–АС65-Е з високою однорідністю по міцності і геометричних характеристиках. Оснащення бурових коронок такими порошками дозволяє підвищити працездатність інструменту при бурінні міцних гірських порід. Встановлено, що з підвищенням міцності порошків марок АС160-Е–АС65-Е і їх однорідності по міцності в сукупності зі збільшенням однорідності по лінійних розмірах інтенсивність зношування коронок знижується.

Ключові слова: алмазні порошки, ступінь дефектності, однорідність, міцність, інтенсивність зношування.

For diamond powders with magnetic properties, which were prepared from diamond grains synthesized in the presence of ferrocobalt, a method is put forward that involves grading of diamond grits by the degree of imperfection and additional classification to separate

narrow 400/355 and 250/220 size ranges. This method is shown to provide elite diamond powders AS160-E through AS65-E that feature a great uniformity of strength and geometrical characteristics. The use of such powders in drilling bits improves the tool performance in hard rock drilling. The drill bit wear intensity is demonstrated to decrease with increasing strength and strength uniformity of AS160-E–AS65-E powders in combination with their improved linear-dimension uniformity.

Keywords: diamond powders, degree of imperfection, uniformity, strength, wear intensity.

1. Новиков Н. В., Невструев Г. Ф., Ильницькая Г. Д. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. – Ч. 1. Теоретические основы метода оценки характеристик качества // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 5. – С. 74–83; Ч. 2. Практическое применение нового метода оценки характеристик качества // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 6. – С. 58–67.
2. М 28.5-272:2008. Методика аналитической оценки прочностных характеристик шлифпорошков синтетического алмаза. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2008. – 15 с.
3. М 28.5-271:2008. Методика аналитической оценки линейных размеров зерен порошков сверхтвердых материалов (СТМ). – Киев: ИСМ НАН Украины, 2008. – 18 с.
4. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Методика определения показателей однородности синтетических алмазных порошков на основе системно-критериального подхода // Инструментальный світ. – 2006. – № 3 (31). – С. 4–6.
5. Зыбинский П. В., Богданов Р. К., Загора А. П., Исонкин А. М. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
6. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Ильницькая Г. Д. и др. Влияние физико-химических свойств высокопрочных порошков синтетического алмаза на эксплуатационные характеристики бурового инструмента // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 243–250.
7. Ильницькая Г. Д., Богатырева Г. П., Невструев Г. Ф. Получение высококачественных алмазных шлифпорошков // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2005. – С. 63–71.
8. Пат. 65128 Україна, МПК В03С7/00, В03С1/00. Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен / М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Д. Ильницька, Г. Ф. Невструев. – Опубл. 15.03.04, Бюл. № 3.
9. Пат. 25515 Україна, МПК В03С7/00, В03С1/00. Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен / М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Д. Ильницька, Г. Ф. Невструев. – Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
10. Пат. 65129 А Україна, МКІ G01N27/12. Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ильницька. – Опубл. 15.03.04, Бюл. № 3.
11. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. – Введ. 01.01.96. – Киев: Госстандарт Украины, 1995. – 71 с.
12. М 26.8-299:2010. Методика определения коэффициента термостабильности шлифпорошков синтетических алмазов. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2010. – 7 с.
13. ТУ У 26.8-05417377-221–2010. Шлифпорошки из синтетических алмазов элитные для бурового и камнеобрабатывающего инструмента. – Введ. 01.01.11 до 31.12.13
14. Богданов Р. К., Загора А. П., Исонкин А. М. и др. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 138 с.
15. Пат. 69947 А Україна, МКІ В03С7/00, В03С1/00. Спосіб одержання шлифпорошків вузької зернистості / Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ильницька. – Опубл. 15.09.04, Бюл. № 9.
16. Пат. 69948 А Україна, МКІ В24D3/00. Шліфувальний порошок і спосіб його одержання / М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Д. Ильницька, Г. Ф. Невструев. – Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.
17. 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: Респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2008. – Вып. 31. – С. 58–63.
18. Бахвалов Н. С. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 632 с.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 15.08.11