

# Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.921.34—492.544.023.5:539.215

Н. В. Новиков, Г. А. Петасюк, Г. П. Богатырева (г. Киев)

## **Исследование влияния модуля и формы ячеек сит на пофракционный выход порошка и размерную однородность выделяемых его фракций при ситовом разделении**

*Изложена оригинальная методика прогнозной оценки пофракционного весового выхода порошков сверхтвердых материалов и их однородности по морфометрическим характеристикам при ситовом разделении. Установлено, что из двух факторов — модуля сит и формы их ячеек — преобладающее влияние на весовое содержание основной фракции порошка и его качество оказывает модуль сит. Применительно к порошкам синтетического алмаза получены аналитические зависимости для расчетного определения относительного весового выхода основной фракции порошка и максимальной его однородности по значению модуля сит, применяемых для ситового разделения.*

***Ключевые слова:** порошки сверхтвердых материалов, ситовое разделение, форма ячеек сит, модуль сит, фракция, весовое количество, однородность, взаимосвязь характеристик.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Однородность сверхтвердых дисперсных материалов (порошков синтетического и природного алмаза, кубического нитрида бора и др.) является важным признаком их качества. Однако до настоящего времени характеристика однородности таких материалов в практике их использования и исследованиях не была достаточно востребована. Определенный интерес к этому вопросу был проявлен в середине 70-х годов прошлого столетия в связи с обоснованием целесообразности и эффективности сортировки алмазных шлифпорошков по форме зерен и прочности при статическом сжатии [1—3]. Важным, но мало изученным есть и другой аспект однородности сверхтвердых дисперсных материалов, а именно: количественный анализ влияния ее степени на показатели процесса абразивной обработки и качество полученной при этом поверхности. Публикации [4—6] по этой проблеме в научно-технической литературе носят эпизодический характер. В то же время отечественный опыт использования абразивного инструмента ведущих зарубежных

ных фирм свидетельствует о том, что данному вопросу уделяют большое внимание, причем еще на стадии проектирования и производства инструмента.

Как показывает анализ современных публикаций по диагностике характеристик порошков сверхтвердых материалов (СТМ), в настоящее время вновь наметилась тенденция более активного вовлечения однородности в сферу практического использования. С одной стороны, это вызвано необходимостью разработки научно-методической базы высокоинформативной сравнительной оценки качества порошков. Актуальность приобретает задача более дифференцированной градации порошков по качеству в условиях насыщенности рынка этого продукта, широкого его ассортимента и расширения географии производителей. Однородность порошка в данном случае является одним из наиболее приемлемых критериев такой градации. С другой стороны, развитие высоких технологий в машиностроении ставит перед разработчиками инструмента новые задачи. В числе таких задач — разработка высокопроизводительного высокоэффективного инструмента, позволяющего реализовать положительные экстремальные возможности концепции высоких технологий. Один из методов решения подобной задачи состоит в использовании в инструменте порошков СТМ с требуемыми значениями важных для сферы использования инструмента характеристик и оптимальной однородностью порошка по ним. С таких позиций однородность можно рассматривать не только как средство оценки качества готовых порошков (т. е. состоявшегося продукта), но и как важный элемент технологии их производства, обеспечивающий возможность контроля качества на различных его стадиях.

Целенаправленного повышения однородности можно достичь:

— на стадии синтеза созданием определенных условий этого процесса и выбором нужных его параметров;

— на стадии получения порошков методами диспергирования и сортировки целенаправленным выбором необходимого оборудования, соответствующим подбором его рабочих элементов и использованием оптимальных режимов процесса;

— на стадии получения порошков методом разделения на отдельные классы крупности тем или иным способом.

Из указанных трех вариантов получения однородных порошков наиболее технологичным следует признать третий, т. е. ситовое разделение по размеру зерен на отдельные классы. Следует сказать, что ситовое разделение выполняет еще и контрольную функцию при идентификации порошка по тому или иному стандарту и в этом смысле является как бы финишной операцией любого другого способа разделения (вибрационного, флотационного и др.).

По сравнению с другими способами разделения ситовая классификация является более простым и известным способом разделения сыпучих материалов и абразивных порошков в том числе. Основными параметрами ситового разделения являются размер и форма ячеек сит и их модуль, время отсева, техническое состояние сит. Анализ литературных источников показывает, что количественная оценка степени однородности выделенных фракций при ситовом разделении на уровне нормативных документов государственного значения не практикуется. Абсолютно не изучены на количественном уровне влияние модуля и формы ячеек используемых сит на степень однородности получаемого порошка. Именно указанным аспектам ситового разделения и посвящена настоящая работа.

## АКТУАЛЬНОСТЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время наметилась тенденция повышения интереса не только к методам количественной оценки однородности, но и к поиску новых способов получения однородных по размерным характеристикам, характеристикам формы и статической прочности порошков. Не в последнюю очередь это связано с появлением новых сфер применения порошков СТМ, практической реализацией высоких технологий в машиностроении и другими направлениями развития современного научно-технического прогресса. Появился ряд оригинальных предложений, направленных на повышение размерной однородности порошков СТМ, получаемых методом разделения. Это касается в основном ситовой классификации [7] и вибрационной сепарации [8], причем как в отдельности, так и комбинированного их использования [9, 10]. Однако все эти предложения очень часто выполнены без должного научного обоснования на количественном уровне взаимосвязи параметров процесса разделения, влияния конструктивных особенностей используемого оборудования на степень однородности получаемых при этом порошков. Анализ показывает, что они дают лишь общую схему получения однородных порошков с граничными значениями режимных параметров. Поэтому представляется актуальным и целесообразным проведение аналитического исследования влияния указанных выше факторов процесса ситового разделения на его результаты. Помимо чисто научного интереса подобные исследования представляют и большой практический интерес. Он касается разработки научно обоснованных технологий получения порошков СТМ способами, включающими ситовое разделение. Созданные научно-методические средства в этом случае могут быть использованы как инструмент теоретической оценки возможности выбранного оборудования обеспечить требуемый компромисс между выходом порошка и его качеством по критерию однородности. С учетом этого, а также актуальности однородности порошка в связи с отмеченными во введении обстоятельствами, целью настоящей работы является:

- разработка научно-методических средств априорной оценки выхода порошка и его однородности в зависимости от модуля сит и формы ячеек (квадрат, окружность, ромб) при ситовом разделении;
- апробация разработанных средств на конкретном порошке.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Достижение поставленной цели прямыми методами, т. е. исследование с проведением натурных испытаний по ситовому разделению, затруднительно, поскольку необходимо располагать большим количеством порошка. Необходимо также иметь в наличии сита с разным модулем и различной формой ячеек. Для преодоления этих трудностей процедуру ситового разделения осуществляли методом математического моделирования. Относительно целесообразности и правомерности такого подхода отметим следующее. Научно-методическое обоснование и экспериментальная проверка математического моделирования как метода проведения процедуры ситового разделения была проведена авторами в [11, 12]. Результаты экспериментальной проверки для сит с ячейками в форме квадрата показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных показателей зернового состава, причем относительная погрешность расчетных данных не превышала значений, регламентируемых стандартом [13]. Поскольку все процедуры ситового разделения (а предполагаемое в настоящем исследовании их общее количество превышает 50) будут

осуществлены одним и тем же методом, то точность оценки количественного выхода фракций порошка во всех случаях будет одна и та же. Существенно и то, что для выявления тенденций изменения зернового состава не так важны абсолютные (точные) значения показателей, как динамика их изменений. Поэтому в проводимом здесь исследовании акцент будет сделан на относительный анализ выхода фракций.

Что касается сит различного модуля и с разной формой ячеек, отметим следующее. На практике для порошков СТМ наиболее употребительны сита, имеющие ячейки в форме квадрата и различающиеся между собой модулем. Наряду с этим используют также и сита с ячейкой в форме окружности [9] (разработана технология выполнения подобных ячеек). При обогащении полезных ископаемых используют сита с очень богатым ассортиментом форм ячеек [14], в том числе и в форме ромба. Поэтому адаптация таких сит к порошкам СТМ не представляет больших, а тем более принципиальных, трудностей.

Исследуемыми факторами процесса ситового разделения в настоящей работе были модуль сит и форма их ячеек, его показателями — выход и качество порошка. Сравнительный анализ качества фракций порошка осуществлялся по ширине проекции зерен и коэффициенту их формы. Установление значений этих характеристик, как известно, сводится к серии однотипных испытаний. Информативной мерой качества порошка в подобном случае служит его однородность по указанным характеристикам. В свою очередь, однородность порошка на количественном уровне может оцениваться либо собственно показателем однородности [15], либо индексом стабильности [16]. В настоящей работе использовали второй из указанных подходов. Физическая природа однородности порошков СТМ обусловлена структурной особенностью порошка как дисперсного материала. Установление значений морфометрических характеристик подобных материалов, как уже отмечалось, сводится к серии однотипных испытаний с последующим усреднением результатов измерений для отдельных зерен. В этом случае однородность является выразителем адекватности полученных средних значений соответствующих характеристик. С позиции методологии науки все три понятия — адекватность, однородность, стабильность — относятся к атрибутам (признакам) качества порошка. Из них первичным является понятие адекватности средних значений (на практике — просто значений) характеристик порошка. При этом однородность и стабильность являются количественной мерой адекватности.

Показатель (индекс) стабильности  $i_{st}$  значений характеристик определяли по предложенной в [16] аналитической зависимости

$$i_{st} = \frac{x_{c,r} x_{c,a}}{(x_{c,a} + s)(x_{c,a} + R)}. \quad (1)$$

Здесь  $x_{c,r}$  — среднее гармоническое,  $x_{c,a}$  — среднее арифметическое,  $s$  — среднеквадратическое отклонение от среднего,  $R$  — вариационный размах значений характеристики (разность между максимальным и минимальным ее значениями). Теоретическими исследованиями [16] доказана высокая эффективность индекса стабильности как инструмента сравнительной оценки качества абразивных порошков. Особенно в случае, когда сравнивают порошки с близкими значениями характеристик, выступающих признаками их качества.

Необходимость использования именно индекса стабильности как показателя однородности в нашем случае обусловлена следующим обстоятельством. Все известные на сегодня методы количественной оценки степени одно-

родности по показателю однородности предполагают разбиение вариационного размаха значений анализируемой характеристики порошка на размерные интервалы. Для устранения влияния такого субъективного фактора при анализе однородности прибегают к стандартным интервалам изменения значений анализируемой характеристики. Это равносильно тому, что порошок привязывают к тому или иному стандарту. Однако на практике часто возникают ситуации, когда нецелесообразно или нежелательно прибегать к разбиению диапазона значений анализируемой характеристики на размерные интервалы. Например, когда сравнивают порошки, идентифицированные по различным стандартам. Именно такая ситуация имеет место в рассматриваемой задаче. С необходимостью располагать более чувствительным (по сравнению с однородностью) показателем адекватности значения характеристик сталкиваются также при решении задач исследования порошков с близкими по значению характеристиками, более точного анализа влияния различных технологических операций обработки продукта синтеза на свойства получаемого порошка. В таких случаях, наряду с однородностью при оценивании адекватности средних значений характеристик порошка, имеет смысл использовать и индекс стабильности или только индекс стабильности.

Исследование проводили на смеси стандартных по [13, 17] шлифпорошков марки АС50 250/200, АС50 315/250 и АС50 400/315 в равной пропорции. Поскольку авторы не располагали техническими паспортами исходных (смешиваемых) шлифпорошков, то фактические показатели их зернового состава были неизвестны. Поэтому с использованием методики [11] проводили расчетное определение показателей зернового состава как исходных порошков, так и их смеси. Полученные в итоге показатели ситового зернового состава и показатели адекватности средних значений ширины проекции и коэффициента формы зерен порошков-компонент и их смеси приведены в табл. 1. Указанные в табл. 1 фактические показатели зернового состава были получены на ситах с модулем  $\sqrt[10]{10} \approx 1,259$  и ячейками в форме квадрата, что соответствует стандартам [13, 17]. Исходные данные для виртуального ситового разделения (длина и ширина проекции пробы зерен в количестве 537 шт. для шлифпорошка АС50 250/200, 512 шт. для шлифпорошка АС50 315/250 и 504 шт. для шлифпорошка АС50 400/315,) были получены на видеокомпьютерном диагностическом комплексе “DiaInspect.OSM” [18]. Смесь порошков-компонент моделировали простым объединением в один файл данных их DiaInspect-диагностики (количество зерен 1553 шт.).

В процессе осуществления ситовой классификации методом математического моделирования набор сит заменяют дискретным рядом длин их ячеек:  $\{Z_n\}_{n=1}^N = z_1, z_2, \dots, z_N$ , где  $N$  — количество сит в наборе (сборке);  $n$  — порядковый номер сита в сборке (нумерация начинается с самого нижнего сита,  $n = 1, 2, \dots, N$ ). Последовательность чисел  $\{Z_n\}_{n=1}^N$  представляет собой геометрическую прогрессию со знаменателем  $m_R = \sqrt[10]{10}$ , который в прикладном материаловедении дисперсных материалов принято называть модулем сит. Это означает, что имеет место зависимость

$$z_n = (m_R)^{n-1} z_1.$$

В стандартах [13, 17] принято  $R = 10$ , что соответствует  $m_R \approx 1,259$ . В стандартах ISO 565, ISO 6106—79, FEPA, BS 1987:19531410:1962, ANSI B74-16 принято  $R \approx 20,9$ , что соответствует  $m_R \approx 1,189$ . Анализ размерного ряда

длин ячеек сит указанных стандартов показывает, что при переходе к каждому следующему сити принятое значение  $m_R$  не всегда выдерживается, поскольку получающиеся длины ячеек сит округляются до целого числа. При этом закономерность (правило) округления не прослеживается и не оговаривается.

**Таблица 1. Расчетные значения показателей зернового состава и адекватности средних значений ширины проекции и коэффициента формы зерен порошков-компонент ( $M_\phi$  — мелкая фракция,  $D_{п\phi}$  — дополнительная к основной фракция,  $O_\phi$  — основная фракция,  $K_\phi$  — крупная фракция,  $Pr_\phi$  — предельная фракция) и их смеси**

Характеристика		Порошки-компоненты			Смесь
		АС50 250/200	АС50 315/250	АС50 400/315	
Показатель зернового состава по фракциям, % (в скобках — зернистость, мкм)	$M_\phi$	0,07	0,001	0,31	20,60 (250/200)
	$D_{п\phi}$	4,62	5,84	3,82	27,65 (315/250)
	$O_\phi$	78,60	73,75	82,65	43,19 (400/315)
	$K_\phi$	15,58	20,41	13,24	8,57 (500/400)
	$Pr_\phi$	1,13	0,00	0,00	0,00 (630/500)
Ширина проекции зерен, мкм	среднее значение	273,4261	341,4330	430,2707	332,7324
	$i_{st}$	0,45238	0,43192	0,51767	0,36125
Коэффициент формы зерен	среднее значение	1,1664	1,1613	1,1534	1,1675
	$i_{st}$	0,61078	0,61514	0,56030	0,57073

В процессе проводимого здесь ситового разделения исследуемым параметром был выход порошка по фракциям  $\Phi_n$  ( $n$  — номер сита, на котором выделена фракция), а также среднефракционные значения ширины проекции зерен и их коэффициент формы. Выход порошка, как это общепринято, оценивали относительным содержанием массы  $M_n$  зерен, составляющих фракцию  $\Phi_n$ .

Анализ выхода порошка и его качества проводили в двух вариантах. В первом варианте предметом анализа была одна фракция  $\Phi_n$ , соответствующая максимальному ( $M_{\max}$ ) выходу порошка, т. е.  $M_{\max} = \max_{1 \leq n \leq N} \{M_n\}$ . Для кратко-

сти изложения в дальнейшем такой вариант анализа будем называть монофракционным. Второй вариант (бифракционный) предполагал исследование тех же выходных параметров, что и для монофракционного, но для двух смежных фракций  $\Phi_n$  и  $\Phi_{n+1}$ , ( $n = 1, 2, \dots, N$ ). В основу выбора таких фракций порошка положено два требования. Первое из них состоит в том, что сумма выхода  $M_n$  и  $M_{n+1}$ , обозначаемая через  $M_n^+$ , по этим двум фракциям должна быть максимальной среди других возможных вариантов фракций, т. е.  $M_{\max}^+ = \max_{1 \leq n \leq N-1} \{M_n^+\}$ . Вторым требованием выступало условие  $M_n \leq M_{n+1}$ ,

т. е. выход фракции с номером  $n$  не должен превышать выход фракции с но-

мером  $n + 1$ . Тем самым этим фракциям, пользуясь нормами стандартов [13, 17], был придан статус основной ( $M_{n+1}$ ) и дополнительной к основной ( $M_n$ ).

Факторами, влияние которых на указанные выше выходные показатели процесса разделения анализировали, были модуль сит и форма их ячеек. В процессе проводимого здесь исследования геометрическим аналогом ячейки сита служили окружность с диаметром  $l$  и ромб с длиной стороны  $l$  и острым углом  $2\alpha$ . В частности при  $\alpha = 45^\circ$  получали обычно используемую ячейку в форме квадрата. Набор сит моделировали совокупностью таких фигур, последующий размерный параметр  $l$  которых получали из предыдущего умножением на модуль  $m_R$ . Исследования проводили для значений  $m_R$  равных 1,059, 1,08, 1,122, 1,166, 1,189, 1,259, 1,585. Значение  $m_R = 1,189$ , как уже отмечали, соответствует американскому стандарту ANSI и британскому стандарту BS на порошки СА, а  $m_R = 1,259$  — украинскому стандарту [13] и стандарту [17]. Остальные значения  $m_R$  являются отвлеченными в том смысле, что не связаны с какими-либо действующими стандартами.

Для каждого из указанных выше значений модуля сит проводили виртуальное ситовое разделение на ситах с ячейками в форме окружности, квадрата и ромба. В качестве пространственно-геометрической модели зерна принимали трехосный эллипсоид. Разделение осуществляли по критерию ширины проекции зерна в случае ячеек в форме окружности и соотношению ширины проекции и высоты зерна — в остальных случаях. Соответствующие критериальные зависимости имеют вид [12]

$$l = b \quad (2)$$

для ячеек в форме окружности и

$$l = \frac{\tau b}{\sin \alpha} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \mu^2} \quad (3)$$

для ячеек в форме ромба. Здесь  $l$  — длина ячейки сита, на котором зерно будет задерживаться;  $b$  — ширина проекции зерна;  $\tau = 0,43785$  — поправочный коэффициент, учитывающий возможное отклонение реальной геометрической формы проекции зерна от принятой его модели;  $\mu = h/b$ ,  $h$  — высота зерна. Общая методология получения подобных зависимостей и математического моделирования процедуры ситовой классификации описаны в [11, 12].

Для автоматизации вычислений, связанных с практической реализацией ситового разделения методом математического моделирования, применительно к решаемой здесь задаче было создано оригинальное программное обеспечение. Результаты исследований систематизированы и представлены в числовом (табл. 2, 3) и графическом (рис. 1—3) виде. При построении графических зависимостей по оси абсцисс откладывали значения показателя  $R$  радикала (корня) из формулы  $m_R = \sqrt[n]{10}$  для определения модуля сит вместо значений самого модуля  $m_R$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего было просчитано 56 вариантов виртуального ситового разделения — два варианта интерпретации максимального выхода порошка (моно- и бифракционный) для семи значений модуля сит и указанных выше четырех типов геометрической формы ячеек. В дальнейшем для удобства изложения модуль сит и форму их ячеек будем называть соответственно первым и вто-

**Таблица 2. Результаты прогнозирования выхода порошка, адекватности значений ширины проекции и коэффициента формы зерен (по индексу стабильности) в зависимости от модуля сит и формы ячейки при ситовом разделении (монофракционный анализ)**

Параметры сит		Выход порошка, %	Среднее значение ширины проекции зерен		Среднее значение Feret-удлинения зерен		Ситовая зернистость фракции, мкм
модуль, $m$	форма ячеек		величина, мкм	адекватность	величина, мкм	адекватность	
1,059 ( $R = 40$ )	○	11,87	439,26	0,9298	1,1280	0,7761	452/426
	□	12,36	397,65	0,9315	1,1596	0,6593	339/320
	◇ $\alpha=15^\circ$	11,66	439,26	0,9340	1,1283	0,7757	716/676
1,08 ( $R = 30$ )	◇ $\alpha=30^\circ$	12,48	396,53	0,9306	1,1641	0,6605	380/359
	○	16,16	394,64	0,9096	1,1589	0,6593	410/380
	□	15,57	407,41	0,9095	1,1485	0,6655	352/356
1,122 ( $R = 30$ )	◇ $\alpha=15^\circ$	15,29	395,93	0,9102	1,1597	0,6586	650/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	16,46	392,34	0,9094	1,1640	0,6598	380/352
	○	22,88	283,95	0,8676	1,1736	0,5737	426/380
1,166 ( $R = 15$ )	□	21,87	432,70	0,8679	1,1283	0,6713	380/339
	◇ $\alpha=15^\circ$	22,04	401,98	0,8713	1,1544	0,6533	676/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	21,87	431,47	0,8684	1,1269	0,6716	426/380
1,189 ( $R = 13,28$ )	○	29,66	407,06	0,8271	1,1477	0,6552	443/380
	□	29,42	422,31	0,8282	1,1383	0,6695	380/326
	◇ $\alpha=15^\circ$	29,32	408,95	0,8303	1,1480	0,6550	702/602
1,259 ( $R = 10$ )	◇ $\alpha=30^\circ$	27,20	378,69	0,8317	1,1516	0,6253	380/326
	○	31,38	386,29	0,8134	1,1496	0,6230	420/355
	□	32,69	392,84	0,8146	1,1462	0,6537	355/300
ДСТУ	◇ $\alpha=15^\circ$	31,69	410,44	0,8134	1,1474	0,6565	710/600
	◇ $\alpha=30^\circ$	30,98	412,31	0,8209	1,1476	0,6562	420/355
	○	38,07	438,25	0,7651	1,1323	0,6676	500/400
1,585 ( $R = 5$ )	□	43,19	419,57	0,7532	1,1439	0,6559	400/315
	◇ $\alpha=15^\circ$	38,57	438,41	0,7546	1,1316	0,6676	800/630
	◇ $\alpha=30^\circ$	39,41	381,37	0,7546	1,4383	0,6238	400/315
1,585 ( $R = 5$ )	○	51,77	428,63	0,6675	1,1374	0,6559	602/380
	□	69,57	361,81	0,5918	1,1542	0,5744	380/240
	◇ $\alpha=15^\circ$	51,16	429,45	0,6692	1,1372	0,6559	954/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	59,24	325,89	0,6084	1,1640	0,5762	380/240

рым независимыми факторами процесса. Анализ полученных результатов будем выполнять по следующей схеме. Сначала оценим совместное влияние каждого из отмеченных факторов процесса ситового разделения на выходные его параметры (полный или двухфакторный анализ). Далее дадим оценку указанного влияния для каждого независимого фактора в отдельности (однофакторный анализ). При этом все полученные результаты вычислений по второму независимому фактору будем усреднять. В частности, при оценке



влияния на выходные параметры процесса модуля сит будем усреднять результаты для всех форм ячеек в пределах анализируемого значения модуля сит (первый однофакторный анализ). При оценке влияния формы ячеек сит усреднение будем осуществлять по всем значениям модуля сит для анализируемой формы ячейки (второй однофакторный анализ).

**Таблица 3. Результаты прогнозирования выхода порошка, адекватности значений ширины проекции и коэффициента формы зерен (по индексу стабильности) в зависимости от модуля сит и формы ячейки при ситовом разделении (бифракционный анализ)**

Параметры сит		Выход порошка, %;	Среднее значение ширины проекции зерен		Среднее значение Feret-удлинения зерен		Ситовая зернистость фракции, мкм
модуль, $m$	форма ячеек		величина, мкм	адекватность	величина, мкм	адекватность	
1,059 ( $R=40$ )	○	23,15	425,05	0,8640	1,1352	0,6722	452/426
	□	21,38	387,53	0,8693	1,1534	0,6577	339/320
	◇ $\alpha=15^\circ$	22,26	426,09	0,8682	1,1347	0,6712	716/676
	◇ $\alpha=30^\circ$	20,85	387,05	0,8712	1,1544	0,6578	380/359
1,08 ( $R=30$ )	○	27,68	380,45	0,8296	1,1501	0,6246	410/380
	□	28,21	393,51	0,8324	1,1493	0,6541	352/356
	◇ $\alpha=15^\circ$	27,38	381,25	0,8293	1,1500	0,6243	650/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	27,10	378,69	0,8282	1,1516	0,6253	380/352
1,122 ( $R=30$ )	○	38,00	380,94	0,7635	1,1478	0,6232	426/380
	□	43,25	406,92	0,7608	1,1426	0,6566	380/339
	◇ $\alpha=15^\circ$	38,00	381,46	0,7639	1,1482	0,6233	676/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	42,71	406,48	0,7630	1,1424	0,6567	426/380
1,166 ( $R=15$ )	○	48,81	380,23	0,7039	1,1485	0,6238	443/380
	□	53,46	391,93	0,6980	1,1434	0,6251	380/326
	◇ $\alpha=15^\circ$	49,23	381,33	0,7036	1,1485	0,6238	702/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	50,26	351,60	0,6965	1,1570	0,6276	380/326
1,189 ( $R=13,28$ )	○	54,23	356,67	0,6757	1,1552	0,6269	420/355
	□	60,73	359,40	0,6688	1,1548	0,6243	355/300
	◇ $\alpha=15^\circ$	56,31	376,99	0,6680	1,1497	0,6250	710/600
	◇ $\alpha=30^\circ$	55,40	379,77	0,6753	1,1482	0,6249	420/355
1,259 ( $R=10$ ) ДСТУ	○	72,00	387,14	0,5946	1,1457	0,6240	500/400
	□	70,85	375,15	0,5907	1,1503	0,6246	400/315
	◇ $\alpha=15^\circ$	71,45	389,09	0,5934	1,1446	0,6242	800/630
	◇ $\alpha=30^\circ$	64,94	333,46	0,5798	1,1617	0,5738	400/315
1,585 ( $R=5$ )	○	97,32	341,82	0,4362	1,1577	0,5724	602/380
	□	85,69	324,55	0,4373	1,1701	0,5713	380/240
	◇ $\alpha=15^\circ$	98,57	338,41	0,4255	1,1604	0,5724	954/602
	◇ $\alpha=30^\circ$	93,12	308,69	0,4816	1,1764	0,5736	380/240

Изучение данных табл. 2 и 3 позволяет сделать следующие выводы. Для исследованного порошка ни одна из четырех рассмотренных форм ячеек не

обеспечила стабильного (постоянного) для всего проанализированного диапазона модулей сит максимального выхода по основной фракции. При этом в распределении данного показателя ситового разделения наблюдается следующая тенденция. В семи случаях из 14 максимальный выход соответствует ячейкам в форме квадрата, в четырех — ячейкам в форме окружности, в двух — ячейкам в форме ромба с  $\alpha = 30^\circ$ , в одном — ячейкам в форме ромба с  $\alpha = 15^\circ$ . Максимальную однородность в пяти случаях обеспечивают ячейки в форме ромба с  $\alpha = 30^\circ$ , в четырех — ячейки в форме ромба с  $\alpha = 15^\circ$  и окружности, в одном — ячейки в форме квадрата. Поэтому априори без виртуального ситового разделения нельзя решить вопрос о том, сита с каким модулем и формой ячеек следует применить для обеспечения требуемого компромисса между максимальным выходом порошка и его однородностью как признаком качества.

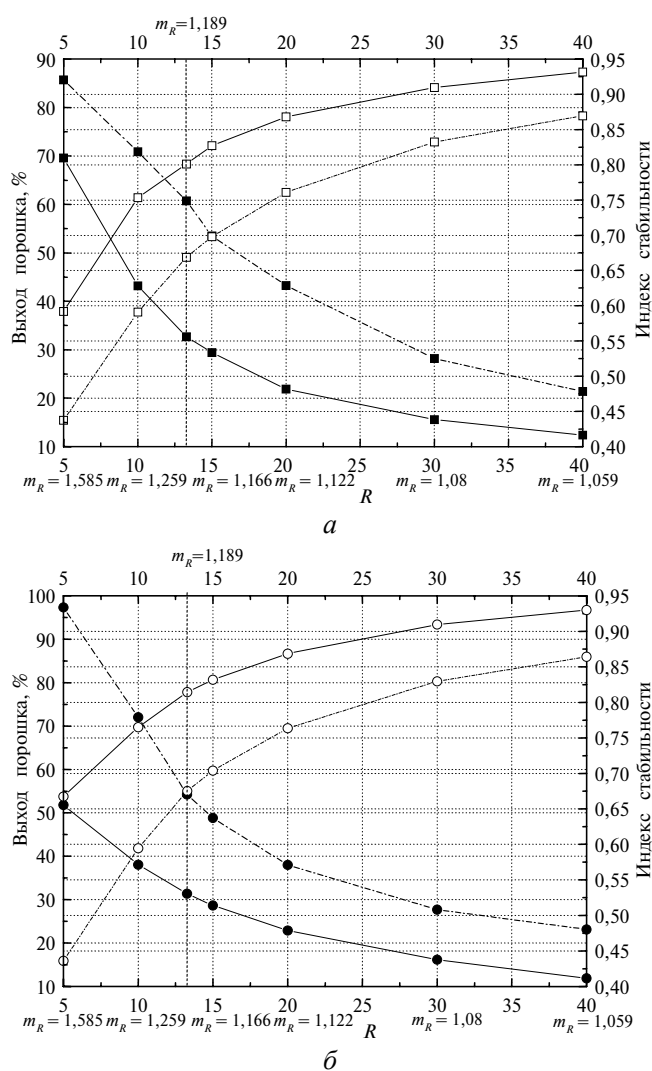
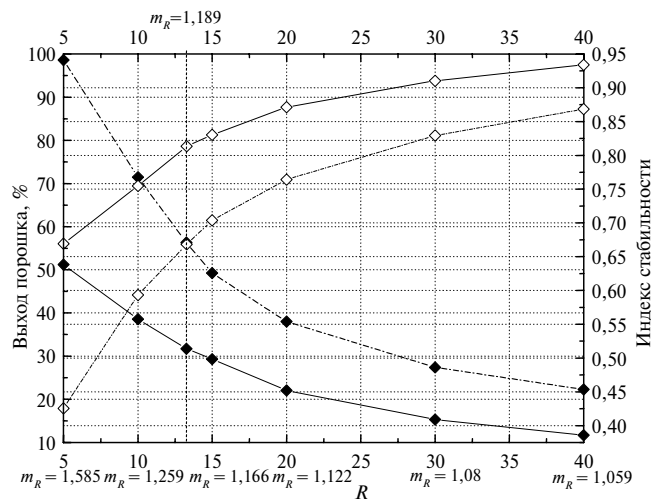
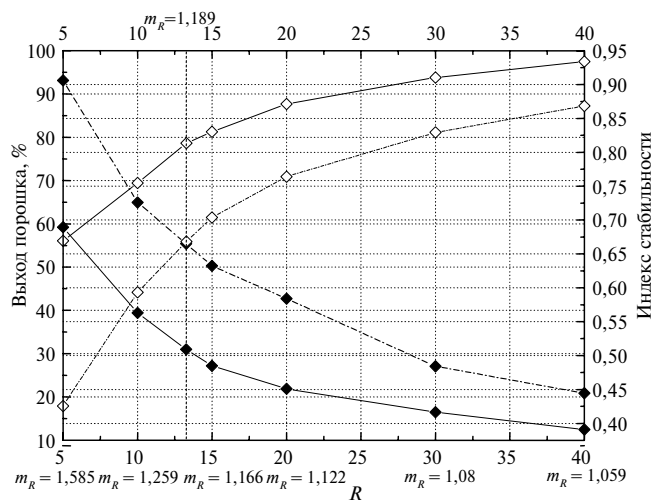


Рис. 1. Зависимость выхода (■, ●, ◆) порошка и его качества (□, ○, ◇), оцениваемого индексом стабильности ширины проекции зерен, от показателя радикала  $R$  в выражении  $m_R = \sqrt[3]{10}$  для определения модуля сит при различной геометрической форме ячеек сит: окружности (а), квадрата (б), ромба с  $\alpha = 15^\circ$  (в) и  $30^\circ$  (г); сплошные кривые соответствуют монофракционному выходу, пунктирные — бифракционному.



а



б

Рис. 1. (Продолжение).

При наименьшем модуле сит максимальный выход порошка больше минимального в 1,07 раза для монофракционного варианта и в 1,11 раза — для бифракционного. С увеличением модуля сит (см. рис. 1) это различие увеличивается и для максимального исследованного модуля сит  $m_R = 1,585$  составляет 1,32 раза в первом случае и 1,15 раза — во втором. Для наименьшего модуля сит максимальное и минимальное значения однородности очень близки как в случае монофракционного варианта, так и в случае бифракционного (превышение составляет 1,004 и 1,008 раза соответственно). С увеличением модуля сит различие увеличивается и при  $m_R = 1,585$  достигает 1,2 раза для монофракционного варианта и 1,11 — для бифракционного. Если за базу сравнения взять сита с  $m_R = 1,059$ , то наибольшее (в 5,5 раза) увеличение максимального монофракционного выхода достигнуто на ситах с  $m_R = 1,585$  и с ячейками в форме квадрата. В случае бифракционного варианта аналогичное увеличение (в 4,26 раза) достигнуто на ситах с тем же модулем, но с ячейками в форме ромба с  $\alpha = 15^\circ$ . Наибольшее уменьшение однородности монофракционного порошка (в 1,4 раза) имеет место при использовании сит с  $m_R = 1,585$  и с ячейками в форме ромба с  $\alpha = 15^\circ$ . В случае бифракцион-

ного варианта аналогичное уменьшение (в 1,8 раза) будет при использовании сит того же модуля и с ячейкой в форме ромба с  $\alpha = 30^\circ$ . Отметим, что полученные на основании двухфакторного анализа оценки являются наиболее адекватными, конкретными и информативными. Более общими, и также представляющими значительный практический интерес, выглядят результаты однофакторного анализа.

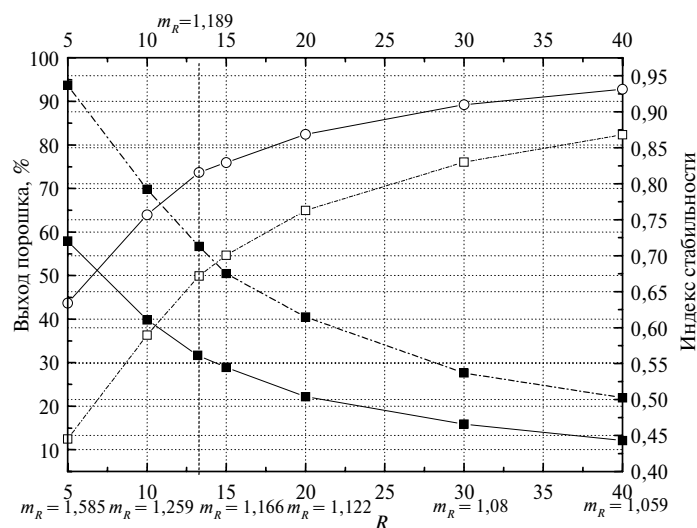


Рис. 2. Зависимость усредненного по всем формам ячеек сит выхода (■) порошка и его качества (□) от  $R$ ; сплошные кривые соответствуют монофракционному выходу, пунктирные — бифракционному.

Первый однофакторный анализ показал, что для усредненных по всем формам ячеек сит значений выхода и однородности увеличение среднего монофракционного выхода составляет 4,79 раза, бифракционного — 4,59 раза. При этом однородность уменьшается в 1,48 раза в первом случае и в 1,9 раза — во втором. Динамика изменения усредненных по ячейкам различной формы выхода порошка  $w$  и его однородности  $u$  при увеличении модуля сит от минимального до максимального показана на рис. 2. Полученные кривые хорошо аппроксимируются зависимостями

$$w = 618,12 \cdot 0,209^{\sqrt[4]{R}}; u = 1,099 - \frac{1,047}{\sqrt{R}} \quad (4)$$

в случае монофракционного варианта выхода и

$$w = \frac{100}{0,811 + 0,6811(R/10)^{1,25}}; u = 1,512 - \frac{1,606}{\sqrt[4]{R}} \quad (5)$$

в случае бифракционного варианта. Зависимости (4), (5) получены с использованием разработанной в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины компьютерно-программной системы автоматизированного построения и анализа многофакторных эмпирических математических моделей LrArгох [19].

Значения усредненного по всем исследованным модулям сит выхода порошка и его однородности для каждой формы ячейки приведены в виде диаграмм на рис. 3. Сравнительный анализ показывает, что оценка процесса по

обобщенным таким образом параметрам менее информативна. Так, в случае монофракционного варианта анализа выхода различие между максимальным и минимальным выходом составляет 1,13 раза, однородности — в 1,015 раза. Для бифракционного варианта такое различие еще меньше и составляет 1,03 и 1,01 раза соответственно.

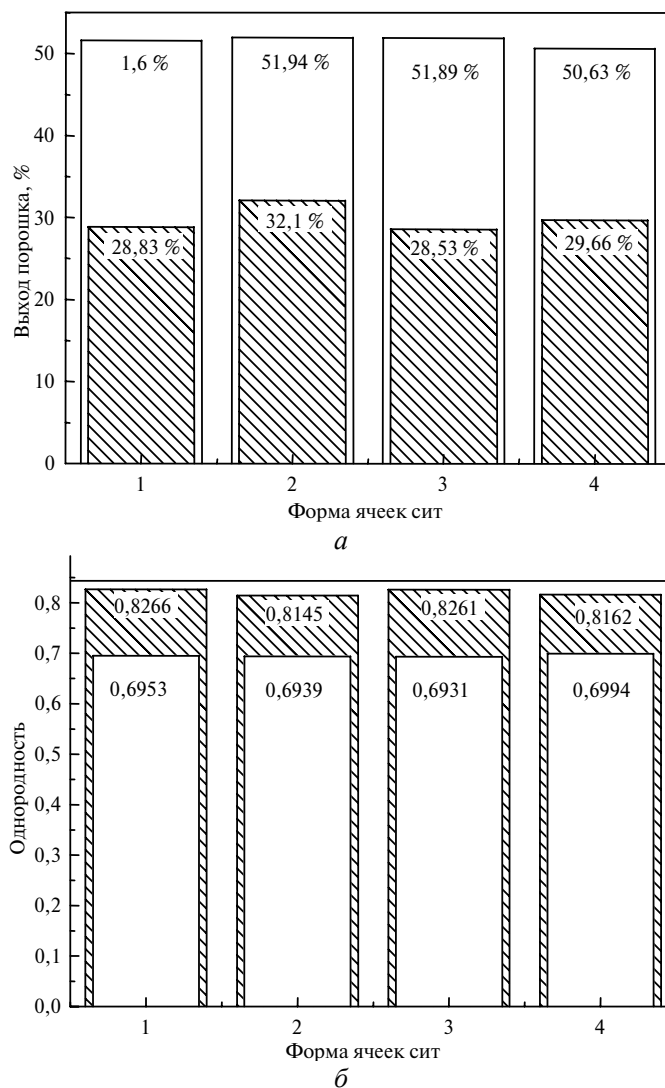


Рис. 3. Диаграмма значений выхода (а) и однородности (б) порошка, усредненных по всем модулям сит, при различных формах их ячеек: окружности (1), квадрата (2), ромба с  $\alpha = 15^\circ$  (3) и  $30^\circ$  (4); заштрихованные столбцы соответствуют монофракционному анализу выхода, незаштрихованные — бифракционному.

## ВЫВОДЫ

Разработана оригинальная методика прогнозной количественной оценки пофракционного выхода порошков СТМ и их однородности по морфометрическим характеристикам при ситовом разделении. Методика позволяет, не прибегая к реальному ситовому рассею порошка, расчетным путем оценить ожидаемые показатели процесса разделения, исходя из модуля предполагае-

мых для использования сит, формы и длины их ячеек. Имеется возможность решения и обратной задачи ситового разделения — определения модуля и формы ячеек, обеспечивающих требуемый компромисс между максимальным выходом порошка и требуемой его однородностью. Созданные научно-методические средства представляют и большой прикладной интерес, связанный с разработкой научно обоснованных технологий получения порошков СТМ способами, включающими ситовое разделение.

Из двух факторов — модуля сит и формы их ячеек — преобладающее влияние на выход основной (с максимальным весовым содержанием порошка) фракции и его качество, оцениваемое однородностью порошка по ширине проекции зерен и их коэффициенту формы, оказывает модуль сит.

На исследованном порошке установлено, что из рассмотренных геометрических форм ячеек (окружность, квадрат, ромб) в семи вариантах из 14 максимальный для всего диапазона модулей сит выход порошка обеспечивают сита с ячейкой в форме квадрата. При этом максимальная однородность по ширине проекции зерен имеет место для сит с ячейками в форме ромба с  $\alpha = 15^\circ$ . Однако преимущество по сравнению с другими формами ячеек в этом случае выглядит менее убедительным по сравнению с максимальным выходом.

На количественном уровне получено подтверждение следующей ожидаемой закономерности ситового разделения — с увеличением модуля сит максимальный выход порошка возрастает, а его размерная однородность уменьшается. При этом максимальному выходу порошка, как правило, соответствует минимальная однородность. Из этого факта следует вывод о том, что на ситах с одним и тем же модулем и идентичной формой ячеек нельзя достичь одновременного максимального выхода порошка и максимальной его однородности по ширине проекции зерен. Разработанные научно-методические и компьютерно-программные средства позволяют, предваряя реальную процедуру ситового отсева, компромиссное решение этой двуединой по преследуемой цели задачи.

На примере порошков синтетического алмаза получена аналитическая зависимость средних по всем исследованным геометрическим формам ячеек (окружность, квадрат, ромб) максимального выхода порошка и максимальной его однородности по ширине проекции зерен от модуля применяемых для отсева сит.

Для уточнения и подтверждения установленных тенденций необходимо провести подобные исследования на большом количестве порошков. Однако более важным достоинством настоящей работы, по мнению авторов, является методический аспект. На конкретном примере продемонстрированы возможности разработанных научно-методических средств как инструмента прогнозирования ожидаемых возможных результатов реального ситового разделения порошка путем предварительного осуществления данной процедуры методом математического моделирования с глубоким информационным анализом как количественных его показателей, так и качества получаемых фракций порошка.

*Викладено оригінальну методику прогнозування виходу порошків НТМ за вагою фракцій і їх однорідності за морфометричними характеристиками при ситовому розділенні. Встановлено, що з двох факторів — модуля сит і форми їх комірок — переважний вплив на ваговий вміст основної фракції порошку та його якість виявляє модуль сит. Стосовно порошків синтетичного алмазу отримано аналітичні залежності для розрахункового визначення відносного вагового виходу порошку за основною фракцією*

і максимальної його однорідності за значенням модуля сит, які застосовують для ситового розділення.

**Ключові слова:** порошки надтвердих матеріалів, ситове розділення, форма комірок сит, модуль сит, фракція, вагова кількість, однорідність, взаємозв'язок характеристик.

*An original method of predictive estimate of the fraction weight yield of SHM powders and uniformity of their morphometric characteristics measured by the sieve analysis discussed. It has been found out that of the two factors—the sieve modulus and shape of openings—the sieve modulus exerts a predominant effect on the powder basic-fraction weight yield and quality. As applied to synthetic diamond powders, an analytical relation has been derived for the calculation of the basic-fraction relative weight yield and maximum uniformity of a power by the modulus of the sieves used.*

**Key words:** superhard materials powders, sieving, shape of sieve openings, sieve modulus, fraction, weight yield, uniformity, interrelation of characteristics.

1. Вобликов В. С., Корнилов Ю. П., Ноздрачев В. И. и др. Корректировка формы алмазных зерен в виброистрателе // Современные синтетические сверхтвердые материалы и области их применения. Тр. ВНИАЛМАЗА. — 1976. — № 4. — С. 82—88.
2. Вобликов В. С., Корнилов Ю. П., Ноздрачев В. И. Методика оценки однородности состава алмазных порошков по прочности зерен // Там же. — 1976. — № 4. — С. 25—27.
3. Корнилов Ю. П., Вобликов В. С. Оценка зернового состава алмазных порошков // Алмазы и сверхтвердые материалы. — 1974. — Вып. 6. — С. 12—14.
4. Оран А. А., Богатырева Г. П., Кошкин А. М. и др. Влияние однородности зернового состава алмазных микропорошков на качество полированной поверхности // Сверхтв. материалы. — 1989. — № 3. — С. 58—61.
5. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Ильницкая 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 им. В. Н. Бакуля НАН Украины. — 2008. — Вып. 11. — С. 243—250.
6. Яцерицин П. И., Зайцев А. Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. — Минск: Наука и техника, 1972. — 480 с.
7. Декларацийний пат. 69949 А Україна, МПК 7 В 03 С 7/00. Спосіб одержання шліфпорошків вузької зернистості // Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ільницька. — Заявл. 16.12.2003; Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.
8. Пат. 64383 А Україна. Спосіб виготовлення шліфпорошків з синтетичних надтвердих матеріалів / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова та ін. — Заявл. 23.05.2003; Опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2.
9. Декларацийний пат. 4821 U на корисну модель Україна. Спосіб виготовлення шліфпорошків із надтвердих матеріалів / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова та ін. — Заявл. 27.04.2004; Опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.
10. Пат. 69947 А Україна, МПК 7 В 03 С 7/00, В 03 С 1/00. Спосіб одержання абразивних шліфпорошків вузької зернистості / Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ільницька. — Заявл. 16.12.2003; Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.
11. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Компьютерное диагностическое сито для идентификации зернистости и зернового состава микроскопических проб алмазных шліфпорошков // Сверхтв. материалы. — 2003. — № 3. — С. 71—83.
12. Петасюк Г. А. Обобщенная математическая модель процедуры ситовой классификации порошков сверхтвердых материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. — 2007. — Вып. 10. — С. 212—2216.
13. ДСТУ 3292—95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. — Введ. 01.01.1996. — Київ: Держстандарт України, 1995. — 71 с.

14. Перов В. А., Андреев Е. Е., Биленко А. Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1990. — 301 с.
15. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Однородность шлифпорошков синтетических алмазов и критерии ее количественной оценки // Сверхтв. материалы. — 1999. — № 5. — С. 65—74.
16. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Петасюк Г. А. К вопросу повышения информативности морфологических характеристик порошков из сверхтвердых материалов, определяемых на видео-компьютерных диагностических комплексах // Там же. — 2005. — № 3. — С. 73—85.
17. ГОСТ 9206—80. Порошки алмазные. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1981.
18. List E., Frenzel J, Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Ind. Diamond Rev. — 2006. — N 1. — P. 42—47.
19. 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. Республиканский межведомственный сб. научн. тр. — Минск, 2008. — Вып. 31. — С. 58—63.

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

Поступила 02.02.10