

**Л.Ж. ГОРОБЕЦ**, д-р техн. наук,

**Л.А. ЦЫБУЛЬКО**, канд. техн. наук, **П.А. БАКУМ**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

**Н.С. ПРЯДКО**, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАНУ и НКАУ),

**В.П. КРАСНОПЕР**

(Украина, Вольногорск, Вольногорский горно-металлургический комбинат)

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНОСТИ ПРОДУКТОВ СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

Постановка проблемы. Повышение эффективности технологий тонкого измельчения актуально из-за реальной необходимости повышения дисперсности порошков до уровня единиц и долей микрометра, что требует обоснования оптимального режима измельчения для конкретных условий. Одной из наиболее важных задач является установление технологических характеристик процесса измельчения, поскольку на их основе возможна разработка системы мониторинга и управления процессом с целью достижения требуемой дисперсности порошков с минимальными энергозатратами.

Теоретической основой выбора оптимальных условий получения тонкодисперсных порошков служат закономерности предразрушения деформируемого твердого тела [1, 2]. Согласно теории эффекты диспергирования являются следствием дискретности строения гетерогенной среды и дискретно-волновых проявлений механизма саморазрушения, а максимальная величина КПД измельчения возможна в условиях нагружения частиц со скоростью порядка критической скорости авторезонанса. По аналогии с автоколебательной системой разрывного типа [3] разрушаемые в процессе измельчения частицы проходят стадию накопления энергии и стадию разрядки (оттока энергии) в результате релаксации напряжений.

При динамичном измельчении энергия нагруженных частиц изменяется скачками, так что авторезонансный механизм разрушения протекает с наибольшей интенсивностью при условии соизмеримости времени накачки частиц энергией со временем разрушения. С позиций диспергирования встречными ударами (или динамическим истиранием) наиболее эффективен режим нагружения измельчаемых частиц с высокой частотой  $\dot{N} = 1/\tilde{T}$  нагружающих импульсов и высокой скоростью  $\dot{\epsilon} = v/d$  динамической деформации в процессе измельчения ( $v$  – скорость удара,  $\tilde{T}$  – период разрушения,  $d$  – размер частиц).

Экспериментально установлен практически линейный рост количества тонких фракций (-74 мкм) железной руды с повышением скорости разрушения ударом ( $v=50-600$  м/с) [2, 4]. Для получения порошков микронных размеров следует рекомендовать наиболее "жесткие" (высокодинамичные) режимы нагружения ( $\dot{\epsilon} > 10^5$  с<sup>-1</sup>,  $v \cong 10^2$  м/с,  $\dot{N} \cong 10^6$  с<sup>-1</sup>) частиц в области уменьшения их исходных размеров  $\leq 100$  мкм [5].

## Підготовчі процеси збагачення

Экспериментальной базой для прогнозной оценки энергозатрат на процесс измельчения является метод неравнокомпонентного нагружения объемным сжатием модельных образцов измельчаемых материалов [6]. В работах [2, 7] определены соотношения, связывающие энергозатраты и эффекты измельчения с параметрами разрушения (пределом прочности  $\sigma_0$  и деформацией  $\varepsilon_0$  на пределе прочности) руд и пород. Исследования показали, что информацию об энергетике тонкого измельчения (диспергирования) содержат параметры запредельной стадии деформирования нагружаемого образца. Эффекты диспергирования проявляются после достижения максимальной прочности, поскольку именно запредельная стадия деформирования содержит отклик нагруженной системы на полученную энергию, и именно на этой стадии раскрывается очаг разрушения, содержащий тонкодисперсные фрагменты и отдельности. Прогноз количества тонкодисперсных фракций для измельчаемого материала возможен по величине запредельной деформации, обусловленной трещинообразованием за пределом максимальной прочности нагружаемого модельного образца.

При разрушении образца объемом  $V$  доля  $\Delta V$  образующихся тонкодисперсных фракций (менее 100 мкм) в первом приближении принимается пропорциональной величине относительной деформации  $\varepsilon$  трещинообразования:  $\Delta V = \varepsilon V$ . Прогнозной оценкой удельного расхода энергии на тонкое измельчение служит локальная плотность упругой энергии  $W_{\Delta V}$  в очагах разрушения (зонах трещинообразования и диспергирования):

$$W_{\Delta V} = W_V / \varepsilon_i = \sigma_0 \varepsilon_0 / 2 \varepsilon_i, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  – деформация на стадии авторезонанса (саморазрушения, диспергирования),

$W_V = \sigma_0 \varepsilon_0 / 2$  – средняя величина критической плотности энергии;  $W_V$  характеризует удельные энергозатраты на дробление – развал сплошности нагружаемого тела с образованием крупных фрагментов и мелких частиц.

Установлена связь эффекта диспергирования, оцениваемого приростом  $\Delta S/V$  удельной поверхности измельченного продукта ( $S_{y0} \sim \Delta S/V$ ) с параметрами  $W_{\Delta V}$  и  $W_V$ , удельной поверхностной энергией  $\gamma$ , характеризующей способность материала к образованию новой поверхности и коэффициентом  $\eta_D$  полезного действия диспергирования [2]:

$$\Delta S/V \approx (W_V \eta_D) / \gamma, \quad \Delta S/V \approx (W_{\Delta V} \varepsilon_i \eta_D) / \gamma \quad (2)$$

Здесь  $\Delta S/V = (S - S_0)/V$ ;  $\Delta S = (S - S_0)$  – прирост общей площади поверхности материала путем измельчения,  $S_0$  и  $S$  – площадь поверхности объекта объемом  $V$  до и после измельчения. Практикой измельчения подтверждены повышенные эффекты диспергирования при увеличении  $W_V$ .

На рис. 1 показано изменение величины  $\Delta S/V$  измельченных материалов с ростом плотности энергии при разрушении [2]. Исследования показали, что

## **Підготовчі процеси збагачення**

процессы тонкого измельчения ( $W_V \approx 10^0 - 10^2$  МДж/м<sup>3</sup>,  $W_{\Delta V} = 10^2 - 10^3$  МДж/м<sup>3</sup>) эффективно реализуются в энергонапряженных измельчителях струйного, планетарного, центробежного типа и дезинтеграторах. Например, в технологии противоточного струйного измельчения получение порошков с размерами частиц менее 10 мкм осуществляют путем увеличения скорости (0,5-1,0 км/с) встречных ударов частиц до значений порядка скорости авторезонанса [8, 9].

В настоящее время накоплена информация о технологических возможностях струйных измельчителей при получении микропорошков из различных полезных ископаемых: сырье и продукты его переработки в цветной, черной и порошковой металлургии, химической, строительной, огнеупорной и других отраслях промышленности [2, 5, 10, 11].

Измельчались однокомпонентные материалы (алмазные порошки, карбиды кремния и бора, электрокорунд, диоксид циркония, шамот, цементный клинкер, уголь, технический углерод, глина, тальк, гипс, известняк, глинозем), а также полиминеральное сырье (талько-магнезитовые породы, железистые кварциты, оловосодержащая, медно-никелевая руда) и концентраты металлов (магнетитовый, вольфрамо-молибденовый, цирконовый, марганцевый, пирротиновый, золотосодержащий). Свойства измельчаемых материалов изменялись в широких пределах: плотность –  $(1,5-6) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, твердость по десятибальной шкале – 1-9.

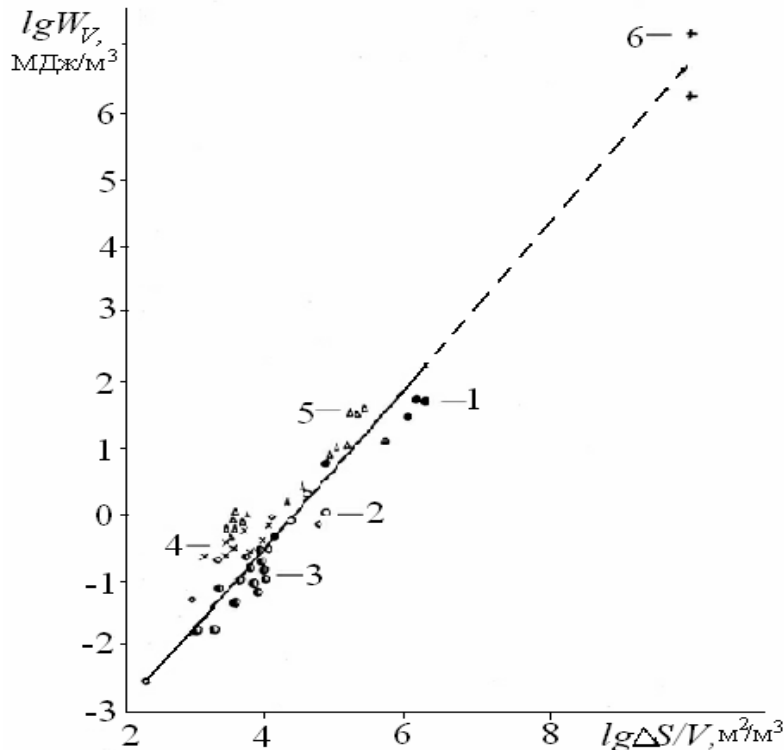


Рис. 1. Влияние плотности энергии  $W_V$  при разрушении природных и синтетических материалов на величину  $\Delta S/V$  удельной поверхности измельченного продукта:

- 1 – стеклянные шарики; 2 – уголь; 3 – антрацит; 4 – габбро; 5 – железная руда;  
6 – разрыв межатомной связи (теория). Размеры образцов:  
1 – 40-1000 мкм; 2 – 50-60 мм; 3 – 10-20 мм; 4 – 3 мм; 5 – 1-6 мм; 6 –  $10^{-10}$  м

Целью данной работы является исследование характеристик дисперсности продуктов струйного измельчения во взаимосвязи с технологическими параметрами этого процесса.

При исследованиях решались следующие задачи:

1) анализ изменений гранулометрического состава для продуктов различной удельной поверхности;

2) установление связи среднего размера частиц измельченных порошков с величиной  $S_{y\partial}$ ;

3) установление корреляционной связи параметра  $S_{y\partial}$  дисперсности порошка с содержанием наиболее тонких фракций (менее 10, 5, 3, 1 мкм);

Основные результаты исследований. Для измельчения использовалась противоточная струйная установка производительностью 2-30 кг/ч (энергоноситель – сжатый воздух среднего давления). Струйному измельчению подвергали отвальный шлак Мариупольского металлургического комбината, шамот Великоанадольского огнеупорного завода, цирконовый концентрат, кварцевый песок, известняк, газовый и бурый уголь месторождений Украины, синтетическое алмазное сырье Полтавского алмазного завода. Крупность исходных материалов составляла менее 2,5 мм. В ходе исследований анализировались также продукты струйного измельчения шлака и циркона на промышленных газоструйных и пароструйных установках Волгоградского керамического завода (Россия) и Вольногорского горно-металлургического комбината (Украина). Производительность установок составляла 1,5-2 т/ч [12].

В экспериментах изменение дисперсности измельченных материалов проводилось путем регулирования частоты  $n$  вращения ротора классификатора типа КОВ, входящего в систему струйной измельчительной установки. Оценка дисперсности готового продукта проведена по величине  $S_{y\partial}$  удельной поверхности (на приборе Т-3 В.В. Товарова) и содержанию узких тонких фракций ( $\beta_{-10}$ ,  $\beta_{-5}$ ,  $\beta_{-3}$ ,  $\beta_{-1}$ ) соответственно менее 10, 5, 3, 1 мкм (на приборе фирмы "MALVERN").

Наиболее важными технологическими характеристиками струйного измельчения являются зависимости  $G=f(P, n)$  и  $\beta=f(n)$  производительности мельницы  $G$  и дисперсности  $\beta$  измельченного продукта от давления  $P$  энергоносителя и частоты  $n$  вращения ротора классификатора.

На рис. 2 показаны связи производительности промышленной газоструйной (температура струй – 400 °С) и лабораторной воздушноструйной мельниц, крупности продукта, характеризуемой остатком  $R$  на контрольном сите (размер отверстий – 60 мкм) с величиной давления  $P$  энергоносителя и параметром  $n$  классификации измельченных материалов (шлака фосфорного производства и шамота). В диапазоне средних размеров частиц шлака  $d = 25-30$  мкм удельная поверхность измельченного шлака составляла  $S_{y\partial} = 0,21-0,25$  м<sup>2</sup>/г.

## Підготовчі процеси збагачення

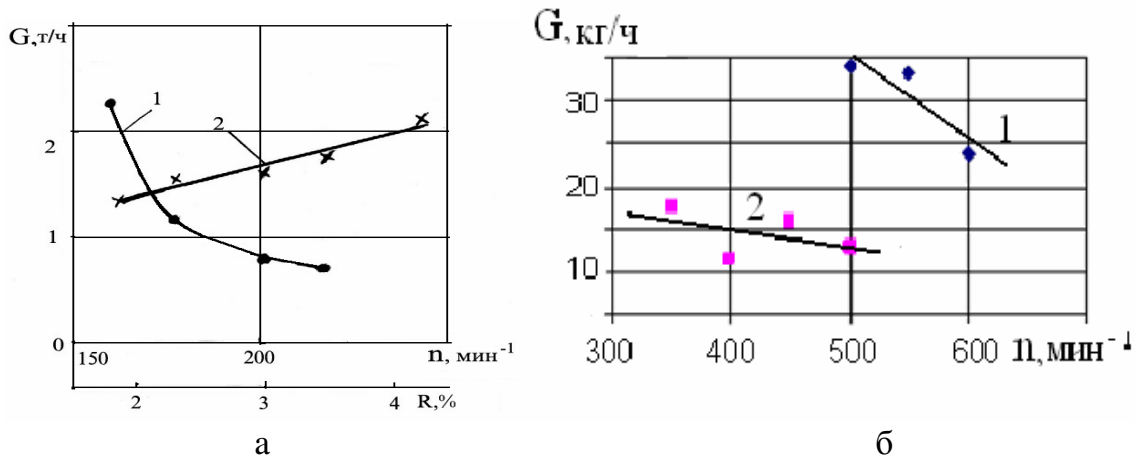


Рис. 2. Зависимости производительности  $G$  газоструйной (а) и воздушной (б) мельниц от частоты  $n$  вращения ротора классификатора и остатка  $R$  на сите 60 мкм при измельчении:

а – фосфорного шлака: 1 –  $G(n)$ , 2 –  $G(R)$ ;  $P = 0,3$  МПа;  
 б – шамота:  $G(n)$ ; 1 –  $P = 0,4$  МПа, 2 –  $P = 0,3$  МПа

На рис. 3 иллюстрируется изменение  $S_{y\partial} = f(n)$  величины  $S_{y\partial}$  измельченных порошков (шамот, известняк, шлак, песок, уголь) в зависимости от частоты  $n$  вращения классификатора лабораторной установки. Видно, что в диапазоне  $n = 200-2600$   $\text{min}^{-1}$   $S_{y\partial}$  порошков возрастает примерно на порядок: от 2000 до 19000  $\text{cm}^2/\text{г}$ .

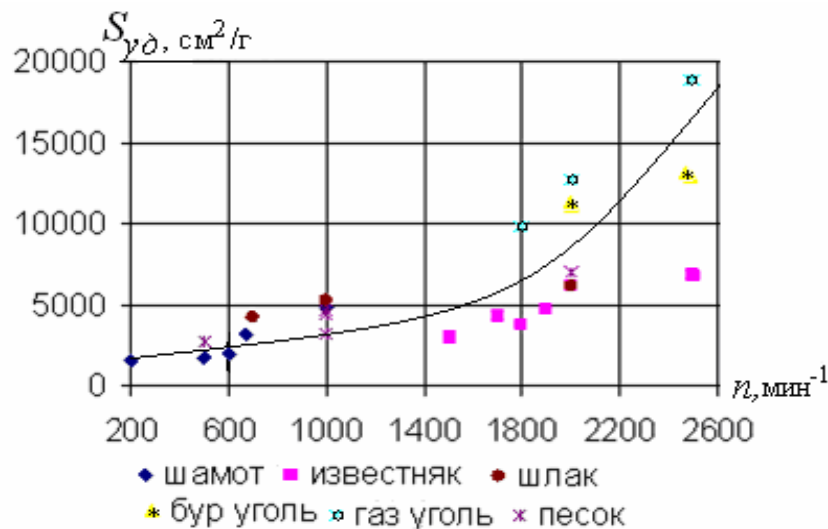


Рис. 3. Влияние режима классификации на величину удельной поверхности измельченных материалов

На рис. 4 представлены характеристики распределений по размерам частиц измельченных материалов при различных режимах классификации:  $n = 200-2000$   $\text{min}^{-1}$ .

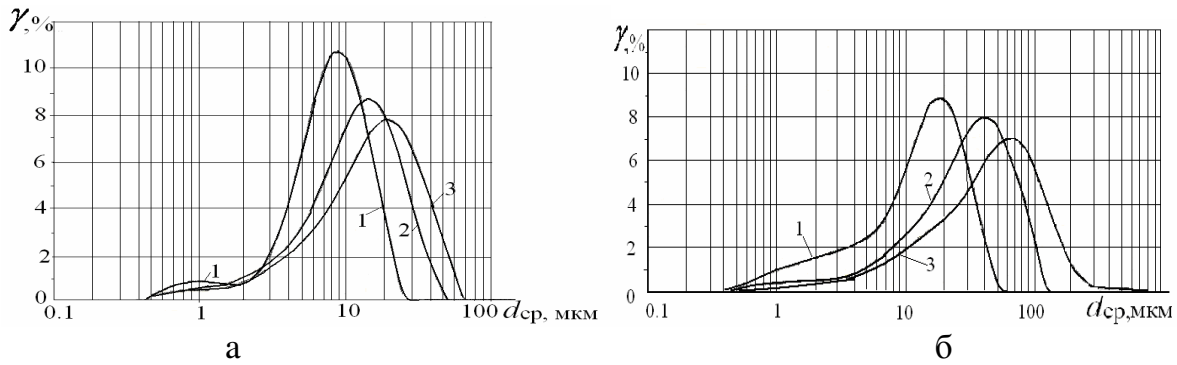


Рис. 4. Распределение частиц по размерам в продуктах струйного измельчения шлака отвального (а) и шамота (б) при различных режимах классификации:  
 а) 1 –  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ , 2 –  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ , 3 –  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 б) 1 –  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ , 2 –  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$ , 3 –  $n = 200 \text{ мин}^{-1}$

Анализ результатов показывает, что рост частоты  $n$  обуславливает увеличение  $S_{y\partial}$  и количества тонких фракций  $\beta_{-10}$  в готовом продукте:

(а) – шлак отвальный:

1 –  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_{y\partial} = 6198 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\beta_{-10} = 63,98\%$ ;

2 –  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_{y\partial} = 5310 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\beta_{-10} = 40,34\%$ ;

3 –  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_{y\partial} = 4262 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\beta_{-10} = 29,45\%$ ;

(б) – шамот:

1 –  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_{y\partial} = 4850 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\beta_{-10} = 34,24\%$ ;

2 –  $n = 700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_{y\partial} = 2546 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\beta_{-10} = 15,1\%$ ;

3 –  $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S_{y\partial} = 1556 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\beta_{-10} = 12,38\%$ .

Графики рис. 4 иллюстрируют характер перемещения максимумов частных гранулометрических характеристик при увеличении частоты  $n$  от 200 до 2000  $\text{мин}^{-1}$ : от размеров микрочастиц порядка 70-20 мкм до 20-8 мкм, то есть в область повышенной дисперсности порошков.

Различия величин  $S_{y\partial}$  и  $\beta_{-10}$  в идентичных режимах классификации (например, при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ) позволяют установить большую склонность ( $S_{y\partial}$  выше на 10%) к диспергированию шлака отвального по сравнению с шамотом.

На рис. 5 показана связь удельной поверхности  $S_{y\partial}$  продуктов струйного измельчения (циркон, шлак, шамот, кварцевый песок) с содержанием в них  $\beta_{-10}$  и  $\beta_{-5}$  наиболее тонких фракций – менее 10 мкм и менее 5 мкм. Видно, что, несмотря на различия свойств измельчаемых материалов, корреляционную связь  $S_{y\partial} = f(\beta_{-10}, \beta_{-5})$  в диапазоне  $\beta_{-5} = 5-25\%$  и  $\beta_{-10} = 10-90\%$  можно признать практически линейной.

## Підготовчі процеси збагачення

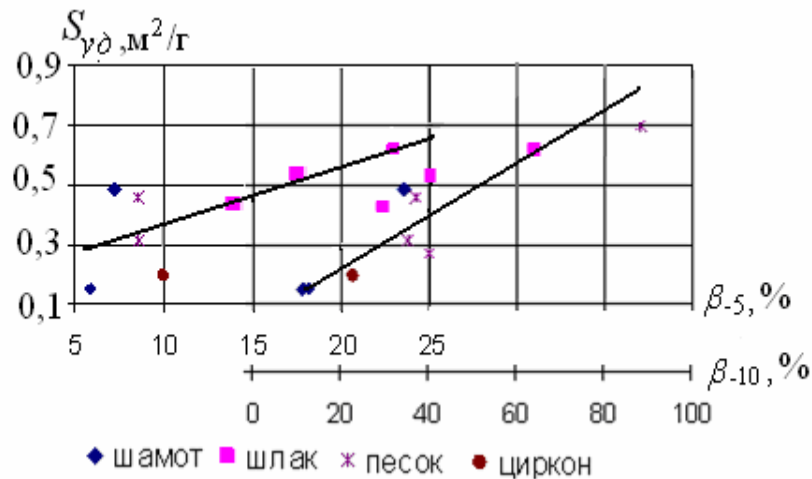


Рис. 5. Связь удельной поверхности продуктов струйного измельчения с содержанием фракций менее 5мкм ( $\beta_{-5}$ ) и менее 10мкм ( $\beta_{-10}$ )

На рис. 6 показаны аналогичные зависимости  $S_{уд}$  и количества тонких фракций ( $\beta_{-5}$ ,  $\beta_{-3}$ ,  $\beta_{-1}$ ) для измельченного цирконового концентрата в более широком диапазоне размеров частиц (менее 5, 3 и 1 мкм).

В экспериментах диапазон дисперсности продукта циклона составил  $S_{уд} = 0,3-0,8$  м<sup>2</sup>/г, продукта фильтра –  $S_{уд} = 1-2$  м<sup>2</sup>/г, при соотношении масс продуктов циклона и фильтра, составившем 80...90% / 20...10%. Из графиков видно, что в диапазоне  $\beta_{-5} = 20-95\%$ ,  $\beta_{-1} = 2-35\%$  наблюдаемые зависимости проявляют линейный характер для обоих продуктов измельчения (улавливаемых в циклоне и фильтре).

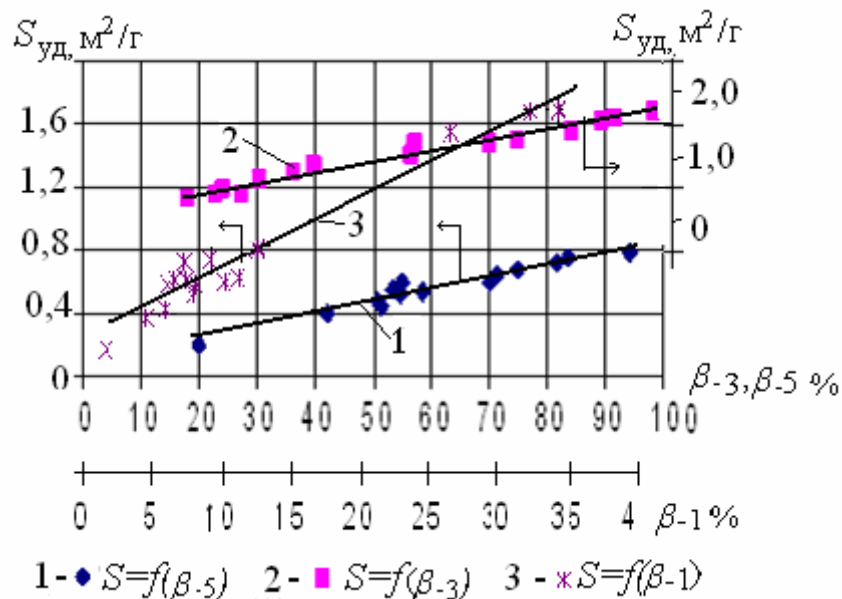


Рис. 6. Зависимости удельной поверхности измельченного цирконового концентрата от содержания в нем узких тонкодисперсных фракций (менее 5, 3, 1 мкм).

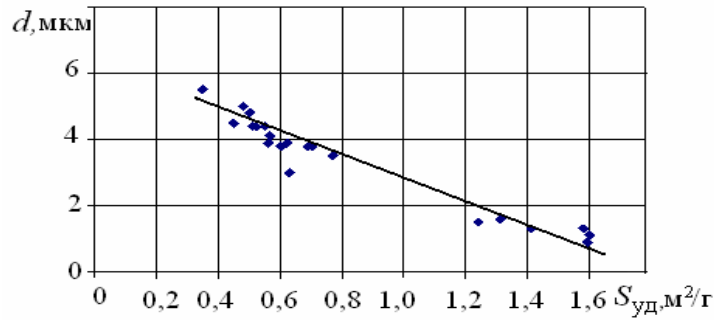
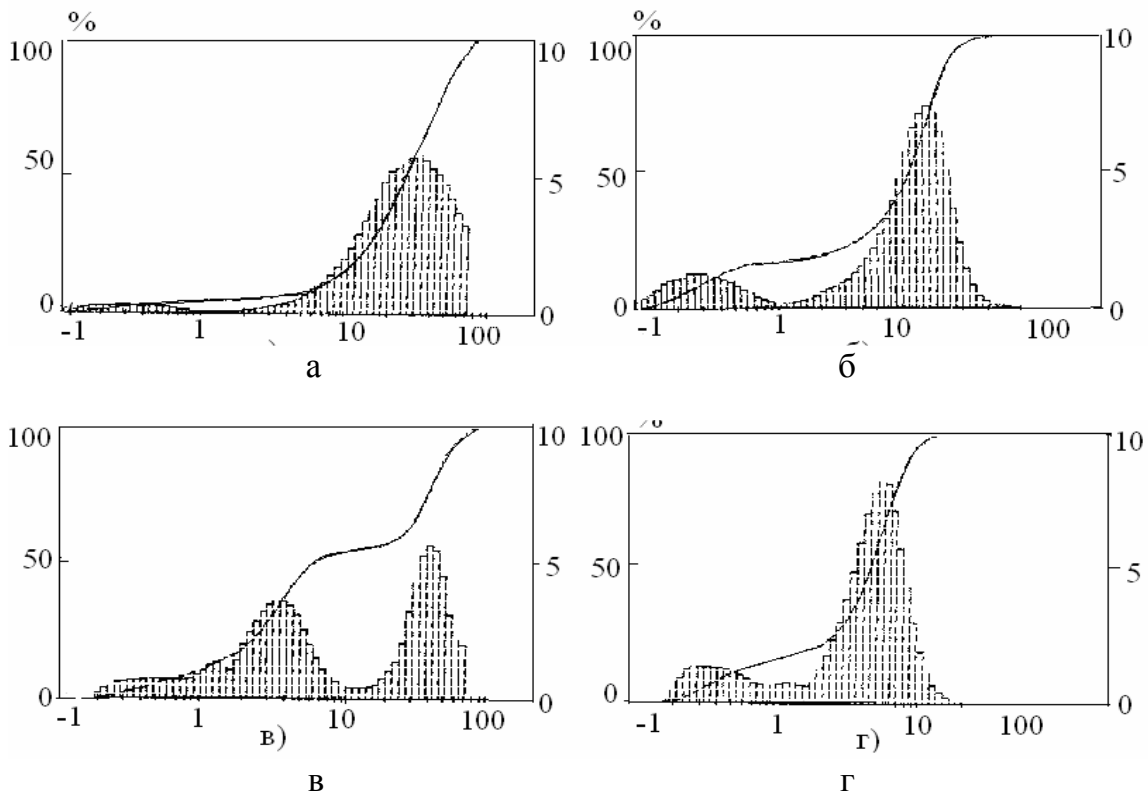


Рис. 7. Связь среднего размера частиц  $d$  с удельной поверхностью  $S_{уд}$  измельченного цирконового концентрата

На рис. 7 показана связь среднего размера частиц  $d$  измельченного в струйной мельнице цирконового концентрата с удельной поверхностью  $S_{уд}$ , измеренной на приборе "MALVERN". Приведенная зависимость указывает на возможность прогноза для продуктов струйного измельчения величины среднего диаметра  $d$  порошка по величине измеренной  $S_{уд}$  и, наоборот, зная величину  $d$ , можно прогнозировать уровень дисперсности измельченного продукта.

На рис. 8 иллюстрируется изменение формы гранулометрических (суммарных и частных) характеристик дисперсности алмазных порошков при различной степени их измельчения, построенных по опытным данным оценки на приборе "MALVERN".





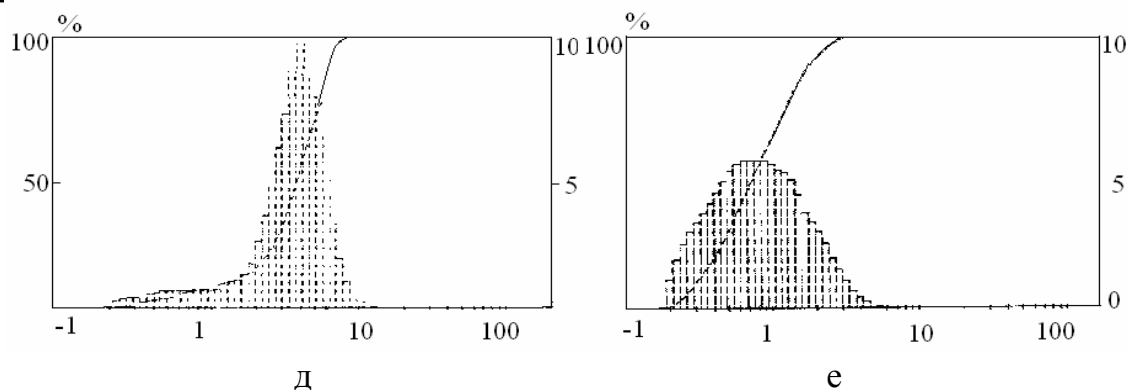


Рис. 8. Изменение суммарных и частных характеристик дисперсности алмазных порошков при различной степени измельчения:

а – $\bar{d} = 25,82$ мкм; $\gamma_{.5} = 7,6\%$ ;	г – $\bar{d} = 4,51$ мкм; $\gamma_{.5} = 58,6\%$ ;
б – $\bar{d} = 8,52$ мкм; $\gamma_{.5} = 30,3\%$ ;	д – $\bar{d} = 3,63$ мкм; $\gamma_{.5} = 80,1\%$ ;
в – $\bar{d} = 6,26$ мкм; $\gamma_{.5} = 45,4\%$ ;	е – $\bar{d} = 0,78$ мкм; $\gamma_{.5} = 99,9\%$

Видно, что в процессе струйного измельчения характеристики дисперсности трансформируются с образованием ряда максимумов в различной области размеров частиц в зависимости от среднего размера  $\bar{d}$  частиц и содержания  $\beta_{.5}$  в продукте фракции – менее 5 мкм. Этот результат можно объяснить взаимным действием в струях двух механизмов измельчения – высокоскоростной удар и динамичное истирание, преобладающая роль которых изменяется на пути разгона частиц и их интенсивного колебательного движения в зоне помола [2].

В частности, гранулометрические характеристики с отчетливо выраженными максимумами характерны для измельчения по механизму истирания, когда продукты содержат измельчаемые частицы (крупную фракцию) и тонкие фракции их абразивного износа – истирания.

На рис. 9 показаны микрофотографии синтетических алмазных порошков – продуктов струйного измельчения различной дисперсности: от среднего размера  $\bar{d} = 31$  мкм до  $\bar{d} = 1,03$  мкм при содержании фракции менее 5 мкм от 2 до 98,9%.

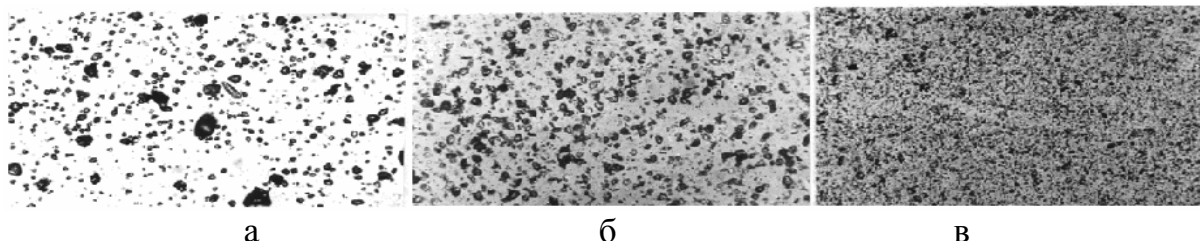


Рис. 9. Микрофотографии алмазных порошков: исходного (а) и измельченных (б – продукт циклона, в – продукт фильтра):

а – $\bar{d} = 31$ мкм; $\beta_{.5} = 2\%$ ; $\times 170$ ;
б – $\bar{d} = 3,63$ мкм;
$\beta_{.5} = 80,1\%$ ; $\times 350$ ;
в – $\bar{d} = 1,03$ мкм; $\beta_{.5} = 98,9\%$ ; $\times 350$

Установлено, что по сравнению с продуктами измельчения шарами форма частиц, обработанных в струйной мельнице, более овализованная и округлая (коэффициент формы частиц размером 10-3 мкм составил 1,3-1,36), что указывает на подверженность частиц истиранию в струях газозвеси.

### *Выводы*

1. Проведенным исследованием установлена целесообразность применения струйной технологии измельчения для получения порошков высокой дисперсности: средний размер частиц  $\bar{d}=1-5$  мкм, содержание фракции менее 5 мкм  $\beta_{-5}$  – до 100%, удельная поверхность продукта циклона  $S_{y\partial}=0,6-1,9$  м<sup>2</sup>/г; продукта фильтра  $S_{y\partial}$  – до 3 м<sup>2</sup>/г.

2. Для прогнозной оценки способности измельчаемого материала к диспергированию (по величине к.п.д. диспергирования) и удельного расхода энергии на измельчение (по величине локальной критической плотности упругой энергии) рекомендуется применение методики исследований запредельной стадии деформирования модельных образцов [2].

3. Экспериментальную оценку диспергируемости материалов струйным методом возможно проводить на основе установления различий параметров  $S_{y\partial}$  и  $\beta_{-10}$  для измельченных продуктов в равных условиях обработки и классификации.

4. Установлена линейная корреляционная связь удельной поверхности продуктов струйного измельчения и содержания в них наиболее тонких фракций (менее 1 и 5 мкм) в следующем диапазоне дисперсности:  $S_{y\partial}=0,3-2$  м<sup>2</sup>/г,  $\beta_{-5}=20-95\%$ ,  $\beta_{-1}=2-35\%$ .

5. Установлена полимодальная трансформация гранулометрических характеристик порошков повышенной дисперсности ( $S_{y\partial} \geq 0,6$  м<sup>2</sup>/г), что указывает на преобладающую роль в образовании тонких фракций механизма истирания по сравнению с разрушением ударами. Эта закономерность проявляется в области размеров измельчаемых частиц (синтетические алмазы, циркон, шлак) менее 8-3 мкм и количестве тонких фракций в продукте порядка:  $\beta_{-5} \geq 30\%$ ,  $\beta_{-10} \geq 60\%$ .

6. На примере измельченного цирконового концентрата установлена линейная корреляционная связь среднего размера ( $\bar{d}=1-6$  мкм) частиц порошка с величиной его удельной поверхности (по опытным данным измерений на приборе "MALVERN") в диапазоне  $S_{y\partial}=0,4-1,6$  м<sup>2</sup>/г.

### **Список литературы**

1. **Бовенко В.Н.** Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: Автореф. дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07/МИЭМ. – М., 1990. – 30 с.

2. **Горобец Л.Ж.** Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дис.... д-ра техн. наук / НГУ. – Д., 2004. – 35 с.

3. **Чупрынин В.И.** Разрывные автоколебания в геофизических системах. – М.: Наука, 1983. – 92 с.

## **Підготовчі процеси збагачення**

4. **Горобець Л.Ж., Шуляк І.А., Верхоробина І.В.** Об эффективности высокодинамичной обработки материалов при струйном измельчении // Всеукр. научно-техн. журнал / Вибрации в технике и технологиях. – Д.: НГУ, 2004. – №1(33). – С. 36-39.

5. **Горобець Л.Ж.** Микророшки: технология и оборудование // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 4(45). – С.33-41.

6. **Алексеев А.Д., Недодаев Н.В.** Предельное состояние горных пород. – Киев: Наук. думка, 1982. – 197 с.

7. **Горобець Л.Ж., Дуброва С.Б.** Оценка энергетических параметров горных пород на стадии саморазрушения // Деформирование и разрушение горных пород. – 1990. – С. 350-358.

8. **Горобець Л.Ж., Бовенко В.Н.** Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения // ФТПРПИ. – 1986. – № 5. – С. 109-111.

9. **Бовенко В.Н., Горобець Л.Ж.** Дискретно-волновая природа диспергирования // Науковий вісник НГУ. – 2008. – №1, – С. 7-9.

10. **Горобець Л.Ж., Пилов П.И.** Механизм и физические закономерности тонкого измельчения // Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности (производство и применение): Материалы 1-й междунар. научн.-практ. конф. – С.-П.: "ИВА", 2003. – С. 3-7.

11. **Пилов П.И., Горобець Л.Ж., Верхоробина І.В.** Технологические возможности струйных измельчителей // ГИАБ. – 2007. – №3. – С. 359-367.

12. **Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобець, В.Н. Бовенко и др.** // Вестник нац. техн. университета "ХПИ". – 2007. – №27 – С.33-41.

© Горобець Л.Ж., Цыбулько Л.А., Бакум П.А., Прядко Н.С., Краснопер В.П., 2010

*Надійшла до редколегії 24.04.2010 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*