

**П.И. ПИЛОВ**, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

**Н.С. ПРЯДКО**, канд. техн. наук, **Е.В. ТЕРНОВАЯ**

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

### **О КИНЕТИКЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ В СМЕСИ**

*Введение.* Полезные ископаемые, перерабатываемые горно-обогатительной и металлургической промышленностью, представляют собой многокомпонентные системы различных по прочности и измельчаемости минералов.

Первыми исследованиями, посвященными проблеме сухого (Холмса и Патчинга) и мокрого (Д.В. Фюрстенау) измельчения смесей разных минералов, установлено, что измельчение кварца и известняка в смеси дает продукты, характеристики крупности которых до некоторой степени подобны характеристикам крупности, полученным при отдельной измельчении каждого минерала. Впоследствии изучением поведения смесей разных минералов в шаровых мельницах занимался ряд ученых (Т. Танака, Д. Келсалл, П. Халасьямани, П. Сомасундаран, А. Мюлар и др.). При этом методом оценки параметров характеристик крупности измельченных продуктов показано, что каждый минерал искусственной смеси измельчается независимо от присутствия другого и характеристика крупности каждого компонента соответствует уравнению Годэна-Андреева-Шумана независимо от измельчения компонента отдельно или в смеси. Однако по характеристикам крупности конечного продукта нельзя проследить течение процесса измельчения

Своими исследованиями Л.Ф. Биленко доказал положение о независимом измельчении разнопрочных компонентов в смеси. Причем установлено, что характеристика крупности компонента, измельченного в смеси с другим компонентом, остается такой же, как и при отдельном измельчении его до той же крупности. При измельчении смеси разнопрочных материалов коэффициент опережающего измельчения, показывающий степень предварительного помола твердого компонента в схеме измельчения двухкомпонентных смесей, не зависит от количества твердой составляющей в смеси, а определяется только свойствами измельчаемых материалов.

При тонком измельчении полезных ископаемых разные по крупности фракции материала ведут себя по-разному. На первом этапе относительно крупный материал измельчается быстрее, и на измельчение требуется меньше энергии. Но при измельчении частиц меньшего размера, т.е. при увеличении суммарной поверхности мелкодисперсной фазы для измельчения частиц требуется больше энергии. При этом наблюдается термодинамическое неравновесие двухфазной системы, для измельчения частиц приходится преодолевать межатомные связи.

*Целью работы* является изучение особенностей тонкого измельчения материалов с позиций поведения частиц разной крупности (разных фракций) в

процессе измельчения.

Сыпучий материал, поступающий на измельчение можно рассматривать как смесь отдельных фракций частиц различного размера, разделенных на классы в соответствии с гранулометрическим составом исходного материала. Известно, что частицы разной величины одного и того же материала обладают различными свойствами: прочностью, упругостью, способностью к измельчению. Основываясь на доказанном положении о независимом измельчении разнородных компонентов в смеси естественно было бы предположить, что узкие фракции материала, находясь в составе смеси, измельчаются по своим законам, независимо друг от друга.

Для проверки гипотезы о независимом измельчении частиц разных по крупности фракций проведено экспериментальное измельчение шамота на лабораторной струйной мельнице УСИ-20 (ИТМ НАНУ и ГКАУ). Измельчение проводилось при давлении энергоносителя  $P = 0,3$  МПа, числе оборотов классификатора  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ . Грансостав исходного материала представлен в таблице 1.

*Таблица 1*

Гранулометрический состав шамота.

Класс крупности, мм	2,5-1,6	1,6-1,0	1,0-0,63	0,63-0,4	0,4-0,315	0,315-0,2	0,2-0,16	0,16-0,1	0,1-0,063	0,063-0,05	<0,05
Выход $\gamma$ , %	36,42	25,6	7,05	7,8	6,43	5,68	2,96	3,52	2,43	1,09	1,03

Методика измельчения и анализа результатов кинетики процесса сохранялась одинаковой для исходного материала шамота и отобранных трех фракций. Для исследования независимости измельчения выбраны 3 фракции исходного материала шамота: крупная (-2,5+1,6 мм), средняя (-1,0+0,63 мм) и мелкая (-0,315+0,2 мм) фракции.

Измельчение проводилось циклами по 1,2, 4 и 8 мин. В конце каждого цикла готовый продукт из циклона, фильтра и остаток помольной камеры смешивались. Анализ гранулометрического состава полученной смеси проводился на аппарате РОТАП. После каждого цикла измельчения по результатам ситового анализа определялся процентный состав смеси и остатки на ситах в долях единицы. В таблице 2 показаны результаты ситового анализа измельчения выбранных фракций и исходного шамота. При этом рассматривались результаты кинетики измельчения, как с учетом продукта фильтра, так и без него. Для дальнейшего анализа выбраны остатки на 4 мелких ситах: -0,1, -0,063, -0,05, -0,04 мм.

## Підготовчі процеси збагачення

Таблиця 2

Кинетика струйного измельчения исходного шамота и его фракций

t, мин	2,5-1,6	1,6-1,0	1,0-0,63	0,63-0,4	0,4-0,315	0,315-0,2	0,2-0,16	0,16-0,1	0,1-0,063	0,063-0,05	-0,05	Цикл
Шамот -2,5+0 мм												
0	36,41	25,60	7,05	7,80	6,43	5,68	2,96	3,52	2,43	1,09	1,03	0
1	29,99	18,34	8,56	7,27	3,49	5,40	2,58	5,03	3,23	12,99	3,12	1
3	23,25	17,45	10,20	7,39	4,05	6,18	2,77	6,64	4,31	12,81	4,95	2
5	20,42	17,10	10,09	7,85	4,28	5,66	2,76	6,47	3,17	13,84	8,37	3
9	11,36	15,81	7,99	7,04	3,68	4,83	2,25	8,45	5,90	21,92	10,76	4
17	4,17	10,22	6,28	4,62	2,37	2,29	3,27	12,53	8,51	31,71	14,04	5
25	2,22	6,48	4,30	3,21	1,43	2,16	3,11	4,71	15,75	37,94	18,68	6
Фракция -2,5+1,6 мм												
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	67,80	15,16	4,79	2,85	1,21	1,49	0,75	1,01	1,76	1,9	1,28	1
2	55,97	19,77	6,43	3,73	1,69	2,59	0,76	2,39	2,21	3,48	0,99	2
3	48,67	19,7	6,60	4,4	1,93	2,68	1,52	6,07	3,03	3,68	1,75	3
4	35,87	20,79	7,3	4,95	2,37	3,38	1,75	3,07	3,24	14,92	2,37	4
5	32,71	21,87	8,42	5,68	2,98	3,67	1,88	4,17	5,19	11,92	1,52	5
7	29,30	20,75	8,01	5,39	2,65	2,93	1,53	3,22	4,53	18,30	3,36	6
9	20,97	20,1	8,11	6,06	3,15	4,56	1,85	5,7	7,48	21,27	0,75	7
13	10,36	15,91	6,99	5,46	2,70	3,89	1,85	3,39	5,40	35,71	8,33	8
Фракция -1,0+0,63 мм												
0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	62,18	14,42	3,51	3,54	1,39	2,25	1,97	3,41	2,52	1
2	0	0	48,70	16,73	4,79	4,79	2,22	4,26	4,50	4,33	2,04	2
4	0	0	39,86	14,84	4,90	4,90	2,08	3,72	5,81	7,12	2,85	3
6	0	0	28,40	14,54	4,98	5,06	1,90	3,82	5,61	14,28	5,59	4
10	0	0	22,33	2,54	4,28	4,94	2,64	9,11	9,95	13,29	3,67	5
14	0	0	10,15	3,98	5,27	4,89	3,10	10,26	9,34	13,67	4,43	6
18	0	0	3,66	10,40	3,23	3,53	1,61	5,59	9,28	23,23	2,06	7
Фракция -0,315+0,2 мм												
0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	7,77	16,91	30,39	15,06	19,07	10,81	
3	0	0	0	0	0	7,36	9,35	29,88	12,13	31,39	9,90	
5	0	0	0	0	0	6,99	10,21	27,45	14,30	31,54	9,51	
9	0	0	0	0	0	6,40	11,43	24,71	16,66	27,89	12,90	
13	0	0	0	0	0	2,52	11,16	18,81	18,92	33,01	15,58	

На рис. 1 показана кинетика измельчения исходного шамота в долях единицы остатков на четырех мелких ситах с учетом продукта фильтра (а) и без него (б). Влияние массы продукта фильтра наблюдается только на кинетике двух последних мелких классов, поэтому рассматривались в дальнейшем результаты кинетики измельчения материала с учетом всех ячеек замкнутого цикла тонкого измельчения, включая фильтр.

На рис. 2 показана кинетика измельчения выбранных трех фракций по остаткам на четырех ситах.

**Підготовчі процеси збагачення**

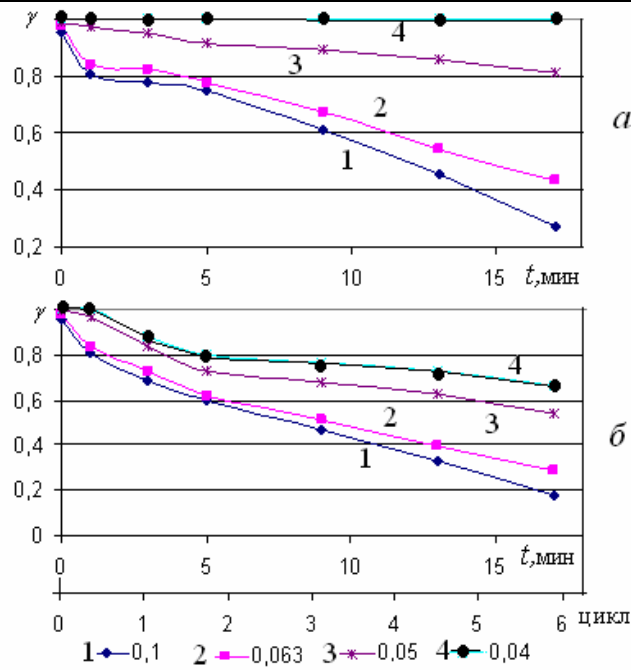


Рис. 1. Кинетика измельчения исходного шамота

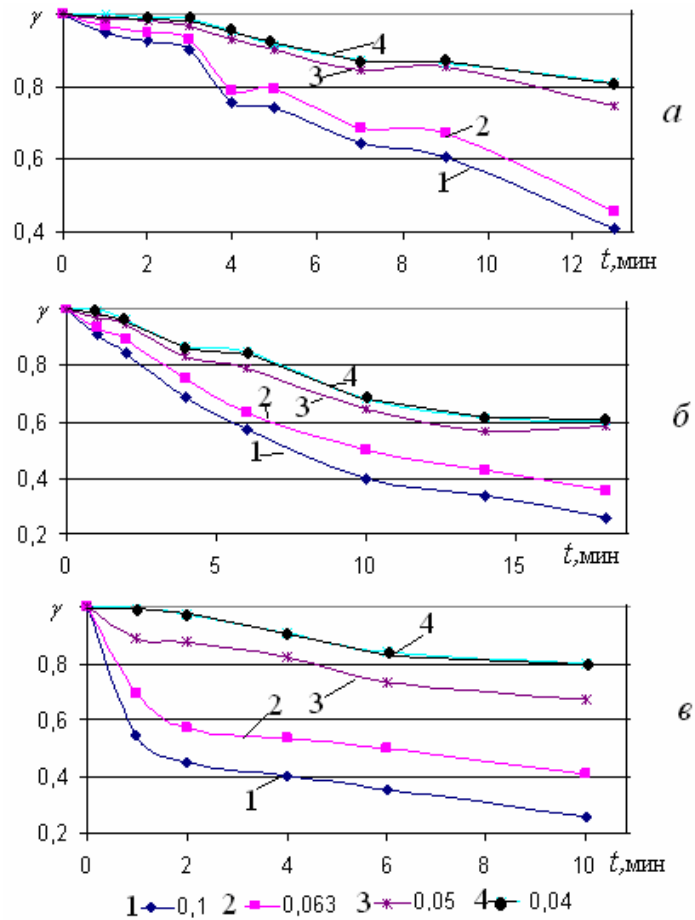


Рис. 2. Кинетика измельчения фракций шамота:  
 а – (-2,5+1,6 мм); б – (-1,0+0,63 мм); в – (-0,315+0,2 мм)

## Підготовчі процеси збагачення

Для нахождения закономерности измельчения фракций в смеси (аналогичной исходному шамоту) на каждом цикле измерений определены средневзвешенные доли выбранных фракций в смеси, т.е.

$$\gamma_{\text{смесь фр}}^i = \gamma_1 R_1^i + \gamma_2 R_2^i + \gamma_3 R_3^i,$$

где  $R_j^i$  – остаток  $j$  фракции на  $i$  сите,  $\gamma_j$  – выход  $j$  фракции в грансоставе исходного материала шамота.

На рис. 3 показаны результаты кинетики измельчения смеси (2), вычисленной по результатам измельчения отдельных фракций шамота и исходного материала (1). Анализ проводился по остаткам на тех же ситах. Хорошее совпадение кривых подтверждает, что характеристики фракций в смеси подобны характеристикам крупности, полученным при раздельной измельчении каждой фракции, что подтверждает независимость измельчения узких фракций материала в смеси.

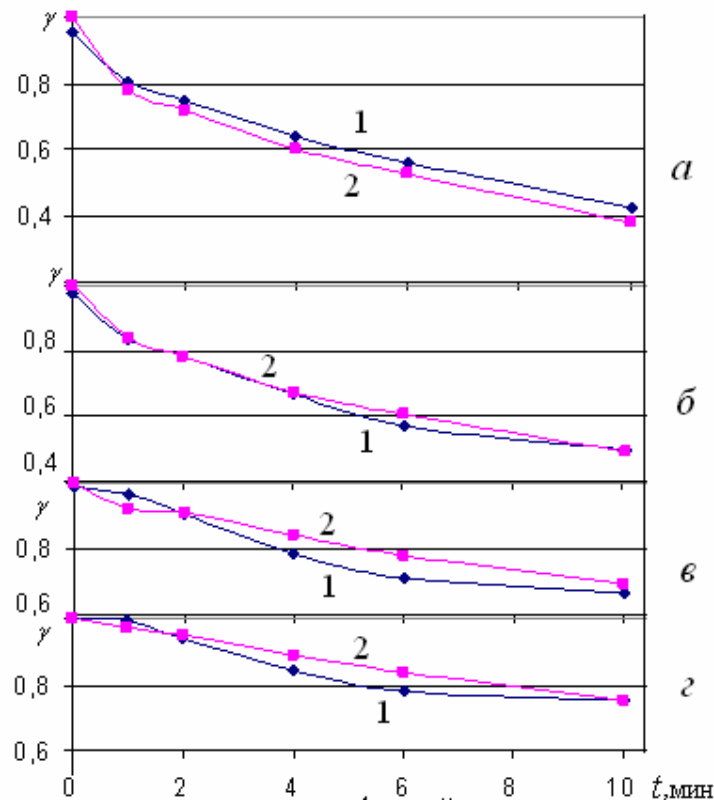


Рис. 3. Кинетика измельчения исходного шамота (1) и вычисленной смеси фракций шамота (2);  
а, б, в, г – остатки на ситах с размерами ячеек соответственно 0,1, 0,063, 0,05 и 0,04 мм

*Выводы.* Результаты сравнения кинетики измельчения отдельных узких фракций и исходного материала шамота позволяют говорить о сохранении за-

## **Підготовчі процеси збагачення**

кономерности кинетики измельчения каждой узкой фракции в смеси независимо от других фракций. Таким образом, закономерность разрушения при тонком измельчении каждой из фракций крупности в их смеси не зависит от наличия других фракций.

### **Список литературы**

1. Биленко Л.Ф., Костин И.М., Киселев А.И. Совместное измельчение различных материалов в шаровых мельницах // Труды ин-та Механообр. – Л., 1982. – С. 16-22.
2. Биленко Л.Ф., Сизяков В.М., Шморгуненко Н.С. Кинетика совместного измельчения минералов различной прочности // Труды ВАМИ. – Л., 1974. – №1. – С. 45-50.
3. Биленко Л.Ф., Орлов Ю.И., Костин И.М. Промышленная проверка положения о независимом измельчении компонентов в шаровой мельнице // Обогащение руд. – 1974. – №4. – С. 20-22.

© Пилов П.И., Прядко Н.С., Терновая Е.В., 2014

*Надійшла до редколегії 25.09.2014 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*