

УДК 622.73

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук

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

Н.С. ПРЯДКО, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАН Украины),

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД

Технологической задачей измельчения полезных ископаемых является получение продукта с заданной дисперсностью при минимальных энергозатратах. Дисперсность должна обеспечить эффективность использования измельченного продукта в последующих технологиях. При обогащении полезных ископаемых доминирующей характеристикой дисперсности является гранулометрический состав, при котором обеспечивается требуемое раскрытие вкраплений рудных и нерудных минералов. Для иных технологий – это удельная поверхность межфазного контакта (измельченных частиц) и другие характеристики.

Поскольку процесс измельчения является весьма энергозатратным, то актуальной научной и практической задачей является установление взаимосвязи дисперсности с затратами энергии на получение продуктов заданных технологических свойств.

Частично эта задача решается при изучении кинетики измельчения, особенно в диапазоне получения тонкодисперсных частиц.

Задачей настоящего исследования является экспериментальная проверка гипотезы Риттингера для тонкого измельчения полезных ископаемых и нашей гипотезы об одинаковой закономерности измельчения классов крупности независимо от наличия при этом других классов.

Экспериментальное изучение кинетики измельчения на примере магнетитовых кварцитов осуществлено по стандартной методике в лабораторной шаровой мельнице 75А-МС объемом 16 л и приводом мощностью 0,75 кВт. Загрузка шаров составляла 24 кг, загрузка измельчаемого материала – 2,9 кг (суммарная степень заполнения 45% по объему).

Через определенное время, установленное методикой и программой исследования, мельницу останавливали, отбирали пробу измельчаемого материала, производили определение его гранулометрического состава методом ситового анализа, весь материал после проведения анализа вновь возвращался в мельницу для дальнейшего измельчения.

Результаты определения гранулометрического состава продуктов измельчения в зависимости от времени измельчения представлены в табл. 1.

По данным табл. 1 составлена табл. 2 суммарных выходов классов крупности более контрольного (остатков на контрольных ситах).

Таблиця 1

Результаты замеров гранулометрического состава
при изучении кинетики измельчения магнетитовых кварцитов

Крупность, мм		Время измельчения, мин. / выход классов крупности, %							
d_{min}	d_{max}	0	20	40	60	80	100	120	140
1	5	63,5	0,0	0	0	0	0	0	0
0,63	1	3	0,3	0	0	0	0	0	0
0,4	0,63	2,6	4,2	0,4	0	0	0	0	0
0,2	0,4	3,3	14,4	3	0	0	0	0	0
0,16	0,2	1,3	6,1	2,5	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1
0,125	0,16	0,5	2,1	3,5	2,3	1	0,4	0,1	0
0,1	0,125	1,6	6,1	5	2,4	1,6	0,4	0,3	0,1
0,063	0,1	4	13,5	12,2	9,6	6,2	4,2	2,7	1,5
0,04	0,063	6	14,6	15,1	14,2	12,2	11,6	8,7	5,4
0	0,04	14,2	38,7	58,3	70,7	78,9	83,3	88,1	92,9
Итого:		100	100	100	100	100	100	100	100

Таблиця 2

Выход суммарного класса крупности от времени измельчения

Крупность, мм		Время измельчения, мин. / суммарный выход классов крупности более d_{min} , %							
d_{min}	d_{max}	0	20	40	60	80	100	120	140
1	5	63,5	0,0	0	0	0	0	0	0
0,63	1	66,5	0,3	0	0	0	0	0	0
0,4	0,63	69,1	4,5	0,4	0	0	0	0	0
0,2	0,4	72,4	18,9	3,4	0	0	0	0	0
0,16	0,2	73,7	25,0	5,9	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1
0,125	0,16	74,2	27,1	9,4	3,1	1,1	0,5	0,2	0,1
0,1	0,125	75,8	33,2	14,4	5,5	2,7	0,9	0,5	0,2
0,063	0,1	79,8	46,7	26,6	15,1	8,9	5,1	3,2	1,7
0,04	0,063	85,8	61,3	41,7	29,3	21,1	16,7	11,9	7,1
0	0,04	100	100,0	100	100	100	100	100	100

На основании данных табл. 2 составлена табл. 3, где показаны приведенные к 100% для исходного состояния (время измельчения равно нулю) остатки на контрольных ситах в зависимости от времени измельчения. По данным этой таблицы построены кинетические кривые и определены для них линии тренда и их уравнения (рис. 1).

Из представленной информации следует, что кинетические кривые, судя по значению коэффициента точности аппроксимации (0,9949...0,9996), с высокой вероятностью описываются экспонентой. Это свидетельствует о корректности широко известного уравнения кинетики измельчения, полученного исходя из того, что скорость сокращения крупного класса пропорциональна массе остатка и некоей константы, зависящей от физико-механических свойств измельчаемого материала и характеристики измельчителя.

Приведенный остаток (%) в зависимости от размера
отверстий контрольных сит для различного времени измельчения

Время измельчения, мин.	Размер сита, мкм			
	40	63	100	125
0	100,00	100,00	100,00	100,00
20	71,45	58,52	43,80	36,52
40	48,60	33,33	19,00	12,67
60	34,15	18,92	7,26	4,18
80	24,59	11,15	3,56	1,48
100	19,46	6,39	1,19	0,67
120	13,87	4,01	0,66	0,27
140	8,28	2,13	0,26	0,13

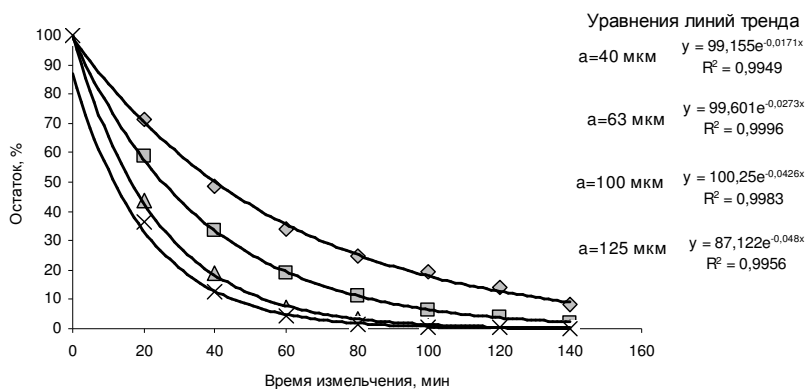


Рис. 1. Приведенный остаток на контрольном сите *a*

При измельчении в неизменных условиях вариативной составляющей процесса является размер отверстия контрольного сита, который определяет нижнюю границу крупного класса. Полученные данные свидетельствуют, что коэффициент в показателе экспоненты удовлетворительно (коэффициент точности аппроксимации 0,9848) описывается линейной зависимостью $k = 0,00041a + 0,0033$. Характер его изменения позволяет сделать вывод о более высокой скорости разрушения крупных классов и ее замедлении для мелких.

Таким образом, для рассматриваемого случая, зависимость приведенного остатка крупных классов (крупнее размера *a* – размера отверстия контрольного сита) от времени измельчения будет

$$R = 100 \exp[-(0,00041a + 0,0033)t].$$

Однако более универсальной характеристикой дисперсности является удельная поверхность измельченного материала, равная отношению площади боковой поверхности твердых частиц к их объему или массе. При известном гранулометрическом составе дисперсного материала его удельная поверхность рассчитывается следующим образом:

$$s = K_s \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\bar{d}_i},$$

где K_s – коэффициент, учитывающий отклонение площади боковой поверхности измельченных частиц от площади равновеликих по объему сферических частиц (для продуктов измельчение он, в среднем, равен 10,5); γ_i, \bar{d}_i – соответственно, выход класса крупности и его средний размер.

К универсальным характеристикам дисперсий относится также средне-взвешенный диаметр:

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \bar{d}_i .$$

На основе расчетов по приведенным формулам и с использованием данных представленных таблиц составлена вспомогательная табл. 4.

Таблица 4

Вспомогательная таблица								
Время измельчения, мин	0	20	40	60	80	100	120	140
Содержание класса <40, %	14,2	38,7	58,3	70,7	78,9	83,3	88,1	92,9
Удельная поверхность $\times 10^{-4}, \text{ м}^{-1}$	9,89	26,71	36,24	41,69	44,94	46,71	48,42	50,08
Вновь образованная удельная поверхность, $\times 10^{-4}, \text{ м}^{-1}$	0,00	16,82	26,36	31,80	35,05	36,83	38,53	40,20
Средневзвешенный диаметр, мкм	1966,78	114,40	55,55	36,69	30,52	27,26	24,96	22,88

Графически данные табл. 4 представлены на рис. 2 и рис. 3. Рис. 2 показывает зависимость удельной поверхности от времени измельчения, которому пропорционален расход энергии на измельчение.

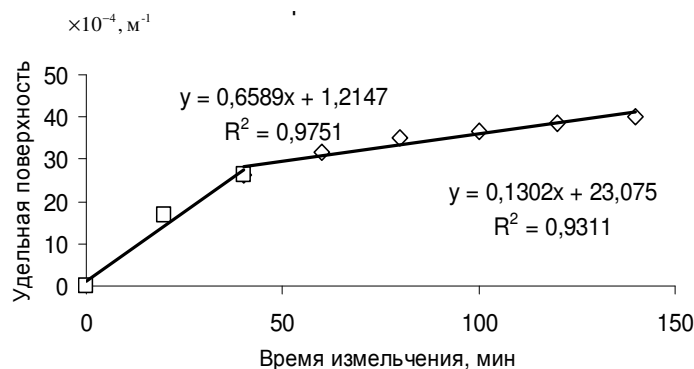


Рис. 2. Кинетика вновь образованной удельной поверхности

Формально данные, представленные на рис. 2, удовлетворительно описываются экспоненциальной зависимостью, что следует также из классического **Збагачення корисних копалин, 2016. – Вип. 62(103)**

уравнения кинетики измельчения и взаимосвязи гранулометрического состава с удельной поверхностью. Вместе с тем, на рис. 2 можно выделить два участка с прямой пропорциональной зависимостью удельной поверхности от времени измельчения. Они описываются прямыми с различными угловыми коэффициентами.

Анализ этих экспериментальных данных и их сопоставление с результатами, полученными другими исследователями, позволяет сформулировать вывод о том, что гипотеза Риттингера в целом подтверждается. Но отдельные участки кинетической кривой свидетельствуют о различной интенсивности измельчения. В целом, можно выделить два таких участка, которые условно можно называть относящимися к измельчению и тонкому измельчению. Для них характерна прямо пропорциональная зависимость энергозатрат на измельчение и величины вновь образованной поверхности. Но для каждого из этих участков характерен свой коэффициент пропорциональности, уменьшающийся при тонком измельчении.

В литературе на этот счет имеются различные взгляды [3], суть которых сводится к тому, что по мере снижения крупности измельчаемых частиц сокращается количество пор и трещин в структуре измельчаемого продукта, проявляется влияние так называемого поверхностного натяжения. Все названное относят к влиянию масштабного фактора, приводящему к увеличению прочности минеральных зерен и росту затрат энергии на образование новой поверхности.

Минеральные полезные ископаемые представляют собой многокомпонентные системы различных по прочности и измельчаемости минералов, которые перерабатываются в смеси.

Исследованиями, посвященными проблеме сухого (Холмса и Патчинга) и мокрого (Д.В. Фюрстенау) измельчения смесей разных минералов, установлено, что совместное измельчение кварца и известняка дает продукты, характеристики крупности которых подобны характеристикам крупности, полученным при раздельном измельчении каждого минерала. Позднее изучением поведения смесей разных минералов в шаровых мельницах занимался ряд ученых (Т. Такака, Д. Келсалл, П. Халасьямани, П. Сомасундаран, А. Мюлар и др.). При этом показано, что каждый минерал 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 [6-8].

Л.Ф. Биленко также доказал независимость измельчения разнопрочных компонентов в смеси. Им подтверждено, что характеристика крупности компонента, измельченного в смеси с другим компонентом, остается такой же, как и при раздельном 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 со-

ставляющей в смеси, а определяется только свойствами измельчаемых материалов [1, 2].

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, поскольку для измельчения частиц приходится преодолевать межатомные связи.

Выше нами сделан вывод о меняющейся прочности измельчаемых частиц в зависимости от их размера, что подтверждается многочисленными исследованиями [3, 4]. В связи с этим, поскольку каждый класс крупности имеет присущую ему прочность, то он может рассматриваться как компонент смеси, которая измельчается одновременно в одном агрегате. И этот класс крупности измельчается с закономерностью, не зависящей от присутствия других классов крупности или иных разнопрочных компонентов.

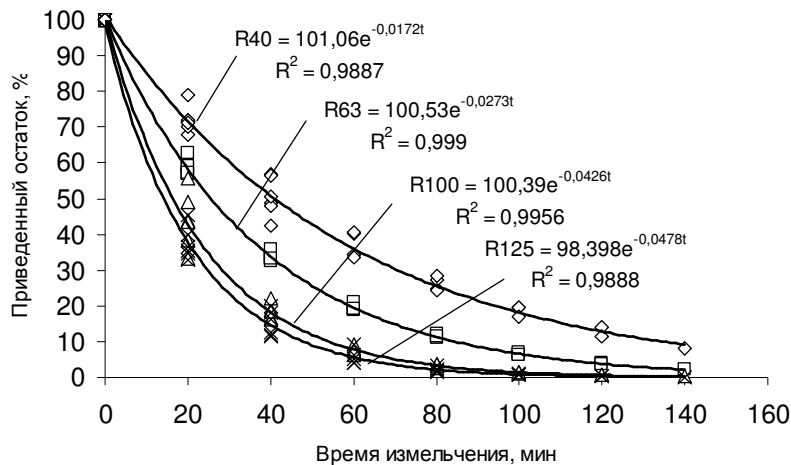


Рис. 3. Зависимость остатка на контрольном сите при измельчении фракций с меняющимся составом исходного продукта

Для доказательства такого утверждения данные табл. 1 представлены в виде табл. 5. В ней для различного времени измельчения представлены остатки материала на контрольном сите с размером ячейки a таким образом, что при времени измельчения t принималось условие $t = 0$, остаток на контрольном сите $R = 100\%$. Т.е. считалось, что каждый раз процесс измельчения как бы начинался заново при ином гранулометрическом составе измельчаемого продукта. Для каждого такого нового "старта" процесса измельчения рассчитывались приведенные значения остатка на контрольном сите из условия, что при каждом таком "старте" $t = 0$ и $R = 100\%$. Результаты таких расчетов представлены на рис. 3 и в табл. 5.

К определению влияния гранулометрического состава
исходного продукта на результаты измельчения

<i>a</i>	<i>t</i>	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>R</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
40	0	100,00										
	20	71,45	0	100,00								
	40	48,60	20	68,03	0	100,00						
	60	34,15	40	47,80	20	70,26	0	100,00				
	80	24,59	60	34,42	40	50,60	20	72,01	0	100,00		
	100	19,46	80	27,24	60	40,05	40	57,00	20	79,15	0	100,00
	120	13,87	100	19,41	80	28,54	60	40,61	40	56,40	20	71,26
	140	8,28	120	11,58	100	17,03	80	24,23	60	33,65	40	42,51
63	0	100,00										
	20	58,52	0	100,00								
	40	33,33	20	56,96	0	100,00						
	60	18,92	40	32,33	20	56,77	0	100,00				
	80	11,15	60	19,06	40	33,46	20	58,94	0	100,00		
	100	6,39	80	10,92	60	19,17	40	33,77	20	57,30	0	100,00
	120	4,01	100	6,85	80	12,03	60	21,19	40	35,96	20	62,75
	140	2,13	120	3,64	100	6,39	80	11,26	60	19,10	40	33,33
100	0	100,00										
	20	43,80	0	100,00								
	40	19,00	20	43,37	0	100,00						
	60	7,26	40	16,57	20	38,19	0	100,00				
	80	3,56	60	8,13	40	18,75	20	49,09	0	100,00		
	100	1,19	80	2,71	60	6,25	40	16,36	20	33,33	0	100,00
	120	0,66	100	1,51	80	3,47	60	9,09	40	18,52	20	55,56
	140	0,26	120	0,60	100	1,39	80	3,64	60	7,41	40	22,22
125	0	100,00										
	20	36,52	0	100,00								
	40	12,67	20	34,69	0	100,00						
	60	4,18	40	11,44	20	32,98	0	100,00				
	80	1,48	60	4,06	40	11,70	20	35,48	0	100,00		
	100	0,67	80	1,85	60	5,32	40	16,13	20	45,45	0	100,00
	120	0,27	100	0,74	80	2,13	60	6,45	40	18,18	20	40,00
	140	0,13	120	0,37	100	1,06	80	3,23	60	9,09	40	20,00

Информация, представленная на рис. 3 позволяет сделать утвердительный вывод о том, что каждый класс крупности, определяемый в данном исследовании как остаток измельчаемого материала на контрольном сите, измельчается независимо от содержания других классов крупности, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициента надежности аппроксимации R^2 .

Полученные результаты позволят осуществить дальнейшее развитие моделирования технологии измельчения, например, концептуально изложенного в статье [5]

Список литературы

1. Биленко Л.Ф., Костин И.М., Киселев А.И. Совместное измельчение различных материалов в шаровых мельницах // Труды ин-та Механобр. – Л., 1982. – С. 16-22.
2. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. – М.: Недра, 1984. – 200 с.
3. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. – М: Недра, 1981. – 343 с.
4. Измельчение. Энергетика и технология / Г.Г. Пивняк, Л.А. Вайсберг, В. И. Кириченко и др. – М.: Изд-кий дом "Руда и металлы", 2007. – 296 с.
5. Пилов П.И., Прядко Н.С. Моделирование замкнутых циклов измельчения на основе гипотезы Риттингера. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92).– С. 98-107.
6. Fuerstenau D.W., Kinasevich R.S. Research on the mechanism of communication in tumbling mills // Can. Metall., Q. – 1964. – № 3. – P. 1-25.
7. Kelsall D.F., Stewart P.S., Reid K.J. Confirmation of a dynamic model of closed circuit grinding with a wet ball mill // Trans. Inst. Min. Metall. – 1968. – № 77. – P. 120-127.
8. Mular A.L. Combination in tumbling mills – a review // Can. Metall. – 1965. – № 4. – P. 31-74.

© Пилов П.И., Прядко Н.С., 2016

*Надійшла до редколегії 23.03.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*