

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

В. И. КЛАССЕН и Э. И. ПОПОВА

**К МЕХАНИЗМУ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЕЛКИХ КВАРЦЕВЫХ ЗЕРЕН
В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 6 V 1952)

Изучение процессов измельчения руд и минералов в шаровых мельницах, широко применяемых в промышленности, проводится в большинстве случаев на основании выявления общих статистических закономерностей. Однако, наряду с этим, необходимо выяснение механизма диспергирования отдельных зерен минералов — «элементарного акта» процесса измельчения.

Некоторые закономерности разрушения исследованы нами при измельчении кварцевых песков. Этот случай отличается от обычных тем, что песок имеет небольшую начальную крупность и значительную однородность размеров и минералогического состава зерен. Кроме того, кварцевые зерна отличаются относительно высокой твердостью и крупностью.

Опыты производились в лабораторной шаровой мельнице диаметром 135 мм фарфоровыми шарами. Скорость вращения мельницы была близка к критической. Эффективность и кинетика измельчения оценивались по увеличению выходов отдельных мелких классов крупности во времени. Исследовалось влияние степени заполнения мельницы шарами с учетом влияния среды — в условиях сухого и мокрого измельчения, а также при добавлении адсорбирующихся веществ — «понизителей твердости» (1). В результате этих исследований получены следующие выводы.

1. Сухое измельчение кварцевого песка происходит наиболее эффективно при заполнении шарами только 20% объема мельницы, что значительно отличается от принятого в практике обычного заполнения мельницы шарами (35—47%) (2).

Установленный факт может иметь следующее объяснение. Как известно, измельчение твердых тел в шаровых мельницах происходит вследствие: а) удара шаров по зернам руды и б) истирания при трении шаров о зерна и зерен друг о друга. Хотя роль этих процессов в отдельности недостаточно изучена, можно считать, что при малом диаметре мельницы и невысоком удельном весе дробящей среды лучшие условия для воздействия шаров на руду путем удара имеют место именно при скоростях, близких к критическим, и при заполнении шарами около 20% объема мельницы. В этих условиях оптимальная скорость вращения, по данным Тунцова, составляет 94% критической ((2), стр. 98). Сила удара мелких шаров из материала небольшого удельного веса определяется не столько их тяжестью, сколько начальной скоростью, с которой они отрываются от поверхности барабана; при заполнении шарами около 20% объема мельницы эта скорость достаточно высока ((3), стр. 108).

Очевидно, твердые и хрупкие зерна кварца лучше измельчаются раскалыванием при ударе, а не трением о их поверхность. Отметим к тому же, что, по имеющимся данным, твердость зерен сильно возрастает с уменьшением их размеров (4).

Таким образом, наибольшая скорость измельчения кварцевого песка достигается в случае создания наилучших условий для ударного действия шаров.

2. Мокрое измельчение кварцевого песка, в отличие от сухого, происходит наиболее эффективно при заполнении шарами около 50% объема мельницы. Очевидно, вода является своеобразным вязким буфером, поглощающим значительную часть кинетической энергии падающих шаров. В этих условиях возрастает относительная эффективность измельчения путем истирания, вследствие чего объем оптимальной шаровой загрузки здесь выше, чем при сухом измельчении.

3. В оптимальных условиях сухое измельчение кварцевого песка интенсивнее мокрого: при сухом измельчении за 1 час суммарный выход фракции мельче 150 μ равен 58%, а при мокром 38%. Однако при мокром измельчении оптимальная загрузка мельницы песком почти в 3 раза выше, чем при сухом измельчении (21,5% вместо 7,4%). Общее использование объема мельницы в этом случае увеличивается, чем и обусловлена, несмотря на меньшую интенсивность измельчения, почти в 2 раза более высокая производительность мельницы при мокром измельчении (см. табл. 1).

Таблица 1

Измельчаемость кварцевого песка в различных условиях
(за 1 час)

Условия измельчения	Заполнение шарами объема мельницы в %	Суммарный выход в % класса			Производительность мельницы по классу <150 μ в г/час
		<150 μ	<74 μ	150—74 μ	
Сухое измельчение	20	58	25	33	120
То же после предварительной обработки песка сульфатным мылом (1 кг/т)	20	65	26	39	130
Мокрое измельчение	50	38	11	27	220
То же с добавлением:					
а) сульфатного мыла (1 кг/т)	50	22	8	14	128
б) соды (3 кг/т)	50	35	11	24	203
в) соды (1 кг/т) и сульфатного мыла (0,3 кг/т) . .	50	47	18	29	273

4. Весьма интересно, что сухое измельчение кварцевых зерен в оптимальных условиях происходит скачкообразно во времени (см. рис. 1). После начального, весьма эффективного измельчения этот процесс резко замедляется, а затем снова протекает с большой скоростью. Такое чередование наблюдается несколько раз, при хорошей воспроизводимости опытов, иллюстрированных рис. 1.

Изменение условий измельчения в направлении снижения ударного действия шаров — увеличением шаровой загрузки, понижением скорости вращения мельницы, добавлением в нее воды — делает менее заметной скачкообразность кинетики измельчения кварцевых зерен. Скачкообразный характер разрушения отмечается во многих работах (4, 5). Так, Л. А. Шрейнером отмечены аналогичные явления при вдавливаниях

конуса в поверхность твердого тела (4). Однако скачкообразность измельчения минералов в шаровых мельницах, насколько нам известно, установлена впервые и может иметь следующее, наиболее вероятное, объяснение. Вначале раскалывание зерен кварца происходит по поверхностям с ослабленными связями (по природным трещинам и включениям, наблюдаемым под микроскопом, а также по другим дефектам кристаллической решетки). После исчерпания основного количества этих дефектов зерна начинают раскалываться при измельчении с большим трудом. Возникает необходимость в дополнительной затрате энергии для создания новых ослабленных поверхностей в кристаллах при их деформации. После этого «периода предразрушения» (1) измельчение снова интенсифицируется.

Указанная скачкообразность измельчения в шаровых мельницах может наблюдаться лишь в определенных условиях — при относительно слабом ударе шаров и при измельчении твердого, монодисперсного и мономинерального материала. В противном случае период и величина скачков будут различными для зерен разных размеров и состава, что и будет сглаживать суммарную кривую кинетики измельчения. Но скачкообразность измельчения отдельных зерен-кристалликов, несомненно, имеет место и в этом случае.

5. В соответствии с общим характером адсорбционного понижения твердости, установленным П. А. Ребиндером с сотр. (1), этот эффект должен иметь место и при измельчении минералов в шаровых мельницах.

В работах Н. М. Лубман (6) и Л. М. Черного (7) устанавливается заметная интенсификация этого процесса. Однако довольно детальные опыты Тунцова (8) дали неустойчивые результаты.

Наши опыты отчетливо показали, что при измельчении в условиях, обеспечивающих осуществление адсорбции молекул поверхностно-активных веществ на поверхности разрушаемых зерен, понизители твердости повышают скорость измельчения. В случае добавления соды и сульфатного мыла при мокром измельчении в течение 1 часа выход класса мельче 150 μ возрастает на 24%, а класса мельче 74 μ — на 63% (см. табл. 1). При сухом измельчении песка, предварительно обработанного сульфатным мылом, выход класса мельче 150 μ возрастает на 12%.

Добавка одной соды практически не влияет на измельчаемость кварцевого песка. Одно же сульфатное мыло, без добавления щелочных реагентов (модификаторов), значительно снижает скорость мокрого измельчения. При этом, очевидно, сульфатное мыло, плохо диспергируясь в суспензии, резко изменяет ее физические свойства, в частности вызывает насыщение суспензии пузырьками газа (пенообразование). Суспензия приобретает упругие свойства, чем амортизируется воздействие шаров на измельчаемые зерна; отрицательное влияние сульфатного мыла преобладает над положительным при мокром измельчении. Вспенивающее действие добавок вообще должно учитываться при оценке их влияния на скорость измельчения.

Отметим также, что вывод Н. М. Лубман о том, что понизители

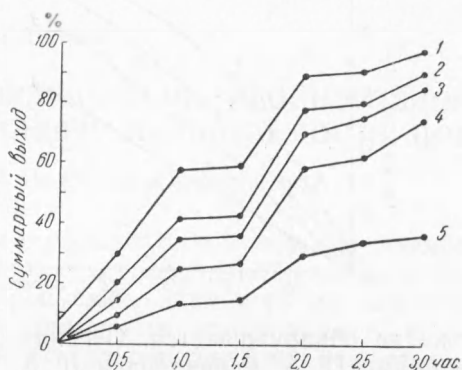


Рис. 1. Кинетика сухого измельчения кварцевого песка при 20% заполнении шарами объема мельницы. Классы: 1 — 147 μ ; 2 — 124 μ ; 3 — 104 μ ; 4 — 74 μ ; 5 — 43 μ .

твердости повышают эффективность измельчения в основном при истирающем действии шаров (6), не может быть распространен на все случаи работы мельниц; при наличии достаточно малых зерен добавки понизителей твердости также облегчают раскалывание при ударе, в полной аналогии с действием понизителей твердости при ударном бурении (1). Рассматривая кинетику измельчения в присутствии понизителей твердости (см. рис. 2), можно заметить, что в этом случае скачкообразность процесса в принятых получасовых интервалах времени

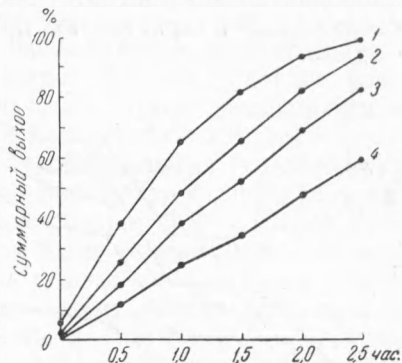


Рис. 2. Кинетика сухого измельчения кварцевого песка при 20% заполнении шарами объема мельницы после предварительной обработки раствором сульфатного мыла (1 кг/т). Классы: 1—147 м; 2—124 м; 3—104 м; 4—74 м

уже не обнаруживается. Очевидно, в полном соответствии с представлениями П. А. Ребиндера и Л. А. Шрейнера (1), понизители твердости значительно сокращают «период предразрушения» зерен.

Авторы приносят глубокую благодарность П. А. Ребиндеру и Л. М. Черному за ряд ценных советов и И. Б. Шлайну за постоянное внимание к работе.

Всесоюзный научно-исследовательский институт стекла
Москва

Поступило
21 III 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ П. А. Ребиндер, Л. А. Шрейнер и К. Ф. Жигач, Понизители твердости в бурении, изд. АН СССР, М.—Л., 1944. ² В. А. Перов и В. Ю. Бранд, Измельчение руд, 1950. ³ Теория и практика дробления и тонкого измельчения, Сборн. под ред. Г. Г. Егорова, 1932. ⁴ Л. А. Шрейнер, Твердость хрупких тел, изд. АН СССР, М.—Л., 1949. ⁵ М. В. Классен-Неклюдова, Пластические свойства и прочность кристаллов, Л., 1933. ⁶ Н. М. Лубман, В сборн. под ред. П. Ребиндера Исследования в области поверхностных явлений, 1936. ⁷ Л. М. Черный, В сборн. Обогащение руд горно-химического сырья, 1950, 159. ⁸ Г. Г. Егоров, Теория дробления и тонкого измельчения, 1938.