

Барбаниягрэ В.Д., д-р, техн. наук, проф.,
Матвеев А.Ф., канд. техн. наук, проф.,
Смаль Д.В., канд. техн. наук, доц.,
Москвичев Д.С., н. с.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦАХ*

xtsm@intbel.ru

Использованием отношения массы мелющих тел к массе размалываемого материала в лабораторных условиях изучены процессы измельчения материалов в шаровой трубной мельнице. Установлена возможность интенсификации процесса измельчения в результате применения максимально плотной шаровой загрузки, которая обеспечивает более высокоэнергетичный помол материала за счет наличия двух факторов: импульса истирающего действия (ИИД) и импульса ударного сжатия (ИУС). В опытно-промышленных испытаниях достигнуто повышение производительности мельницы на 15-20%.

Ключевые слова: плотная загрузка, импульс истирания, импульс ударного сжатия.

Предпринят новый подход к исследованию измельчения в шаровых трубных мельницах [1–10], в основу которого положено применение не энергетических показателей процесса, как это общепринято в научно-технической литературе, а отношение масс взаимодействующих ингредиентов-мелющих тел и размалываемого материала. Отношение их масс позволило выделить фактор, величина которого оказывает существенное влияние на процесс помола. Этим фактором оказался объем размалываемого материала, численное значение которого находится в знаменателе, из чего следует, что для увеличения воздействия мелющих тел на размалываемый материал необходимо уменьшить знаменатель рассматриваемого отношения, что возможно только уменьшая объем размалываемого материала, находящегося в пустотах между шарами, т.е. увеличивая плотность укладки шаров. Так возникла идея применения максимально плотной шаровой загрузки для интенсификации процесса помола.

Предложен механизм воздействия совокупности шаров мелющей загрузки на размалываемый материал в виде импульса ударного сжатия (ИУС) [7], возникающего в момент их макси-

$$\text{ИУС} = \frac{m_{\text{м.т.}}}{m_{\text{орм.}}} = \frac{\gamma_{\text{м.т.}} \cdot V_{\text{м.т.}}}{\rho_{\text{орм.}} \cdot V_{\text{орм.}}} = \frac{7,86 \cdot 0,74}{1,5 \cdot 0,26} = 14,91 \left[\frac{\text{Т}}{\text{Т}} \right]$$

Данное соотношение показывает, что размалывающее действие практически в два раза больше, чем при обычной загрузке.

Размер пустоты между шарами характеризуется диаметром вписанного в неё шара. Виды возможных плотных шаров, размеры пустот и вписанных в них шаров приведены табл. 1.

Не все приведенные в таблице мелкие шары могут быть использованы в качестве вписанных в пустоты между основными (крупными) шара-

мального контакта в нижней точке соприкосновения шаров с цилиндрической поверхностью барабана мельницы. В расчете на 1 м³ шароматериальной загрузки рассматриваемое соотношение имеет следующий вид:

$$\text{ИУС} = \frac{m_{\text{м.т.}}}{m_{\text{орм.}}} = \frac{\gamma_{\text{м.т.}} \cdot V_{\text{м.т.}}}{\rho_{\text{орм.}} \cdot V_{\text{орм.}}} \left[\frac{\text{Т}}{\text{Т}} \right],$$

где $m_{\text{м.т.}}$ – масса мелющих тел, т/м³; $m_{\text{орм.}}$ – масса одновременно размалываемого материала, т/м³; $\gamma_{\text{м.т.}}$ – плотность мелющих тел, т/м³; $\rho_{\text{орм.}}$ – насыпная масса размалываемого материала, т/м³; $V_{\text{м.т.}}$, $V_{\text{орм.}}$ – доля общего объема загрузки, занимаемая мелющими телами и размалываемым материалом соответственно.

Применительно к 1 м³ шаровой загрузки 1-ой камеры мельницы:

$$\text{ИУС}_{\text{ст}} = \frac{7,86 \cdot 0,59}{1,5 \cdot 0,41} = 7,54 \left[\frac{\text{Т}}{\text{Т}} \right] \quad (1)$$

При плотной упаковке шаров пустоты между ними составляют 26% общего объема, шары соответственно занимают 74% шароматериальной загрузки. Отношение массы шаров к массе материала:

Шары диаметром 10–15 мм могут пройти в отверстия межкамерных и выгрузочных диафрагм. Если размеры основного и вписанного шара различаются в 10 раз и более, то подвергаются самосортировке в мельнице, которая в данном случае является своеобразным ситом, на котором всегда разделяются мелкие и крупные фракции материала. Для формирования устойчивой плотной укладки оптимальной является пара шаров (основной и вписанный), отношение

масс которых должно находиться в интервале 1,5–3,5. Указанному условию соответствуют пары шаров с заполнением кубической пустоты, d_0/d_b : 100/70, 80/60, 70/50, 40/30, 30/20, 25/17. Для формирования мелющей загрузки двухка-

мерной мельницы достаточно взять четыре размера шаров (две пары), вместо 10 размеров шаров в традиционной загрузке.

Таблица 1

Двухшаровые плотные упаковки

Виды шаров	Варианты пар шаров плотной упаковки				
	1	2	3	4	5
Диаметр основного шара (d_0), мм	100	80	70	50	40
Диаметр вписанного в пустоту шара d_b , мм	70 ¹ ; 40 ² ; 20 ³	60 ¹ ; 33 ²	50 ¹ ; 30 ²	40 ¹ ; 20 ²	30 ¹ ; 17 ²

1 – кубическая пустота (образуется восьмью соседними шарами);

2 – октаэдрическая пустота (образуется шестью соседними шарами);

3 – тетраэдрическая пустота (образуется четырьмя соседними шарами).

Расчеты показывают, что производительность мельницы с плотной шаровой загрузкой выше на 60-70%, чем на традиционной загрузке. Однако лабораторные испытания на двухкамерной мельнице Гипроцемента и кратковременные опытно-промышленные испытания, показали повышение производительности мельницы в пределах 20-30%. Основная причина заключается в сортировке шаров по размерам в процессе их взаимодействия с бронифутеровкой мельницы. При этом часть крупных шаров концентрируется около межкамерной и выгрузочной диафрагм, что частично разрушает плотность шаровой загрузки. Для сохранения устойчивой шаровой загрузки нами предложена специальная бронифутеровка, содержащая желоба, направленные вдоль окружности барабана мельницы, и спиральные канавки. Желоба препятствуют передвижению и классификации шаров вдоль оси мельницы, а спиральные канавки предназначены для ускорения движения размалываемого материала и достижения его оптимального количества, чтобы сохранить заданную величину ИУСа и обеспечить высокую степень измельчения материала и повышенную производительность мельницы.

Отличительная особенность энергии мелющей шаровой загрузки состоит в том, что она диссипирована (распределена, раздроблена) на микроскопические доли энергии отдельных шаров, которые корректнее рассматривать на примере одного шара: ударное действие шара в водопадном режиме описывается выражением $IUC = m \cdot g \cdot \tau$, где m – масса шара, кг; g – ускорение силы тяжести, м/с²; τ – время падения шара, с.

$$\tau = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}},$$

где h – высота падения шара, м.

$$\tau = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,3}{9,81}} = 0,5 \text{ с.}$$

$$IUC = 1,41 \cdot 9,81 \cdot 0,5 = 6,9 \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Детальный анализ показал, что в водопадном режиме движения шаров имеет место еще один механизм действия шаров на размалываемый материал, представляющий собой импульс истирающего действия (ИИД), количественно равный кинетической энергии шара в верхней точке отрыва от поверхности барабана. О наличии такой энергии свидетельствует последующая траектория движения шара по параболе, в отсутствие такой энергии шар падает вниз по вертикальной линии (доказано экспериментально на лабораторной мельнице). Количественно энергия шара диаметром 70 мм равна: $IID = m \cdot V$, где m – масса шара, кг; V – скорость отрыва шара от поверхности барабана, м/с, равная линейной скорости движения окружности барабана, контактирующей с шаровой загрузкой на подъемном участке траектории:

$$V = \frac{2\pi R \cdot \nu}{60},$$

где R – радиус мельницы, м; ν – частота вращения мельницы, мин⁻¹.

$$V = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 23,2}{60} = 2,43 \text{ м/с.}$$

$$IID = 1,41 \cdot 2,43 = 3,4 \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Таким образом, шар в водопадном режиме оказывает двойное действие на размалываемый материал, а именно, истирание материала в верхней точке отрыва от поверхности барабана и ударное сжатие материала при контакте с поверхностью в нижней точке барабана. Суммарное действие шара массой 1,41 кг за один цикл (подъем-падение) составляет:

$$IUC + IID = 6,9 + 3,4 = 10,3 \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность процесса грубого помола клинкера в первой камере мельницы, имеющего кратность измельчения, равную ~ 50 (с 15 мм до 0,3 мм) и в том числе 20–30 % готового цемента конечной тонкости помола (< 80 мкм).

Совсем другая ситуация имеет место во второй камере тонкого помола материала, оснащенной гладкой бронефутеровкой. В движении мелких шаров из-за их недостаточной высоты подъема отсутствует четко выраженные импульсы ударного сжатия и истирающего действия. Основная масса мелких шаров (d=20-30 мм) совершает медленное поступательно-вращательное движение с полным перемешиванием материала за один оборот барабана мельницы. Так как общее количество шаров во вто-

рой камере мельницы на порядок больше, чем в первой камере, то переданная им энергия диссипирована до такой степени, что единичный шар не в состоянии совершить необходимый истирающий акт воздействия над материалом. Таким образом, почти вся совокупность энергии мелких шаров превращается в теплоту, а процесс измельчения материала прекращается, наглядным примером которого является диаграмма помола на рис. 1, на которой удельная поверхность и остаток на сите 008 представлены равными линиями параллельными оси абсцисс. Очевидно, что следует и во второй камере создать действенный энергетический потенциал шарово-материальной загрузки по аналогии с первой камерой.

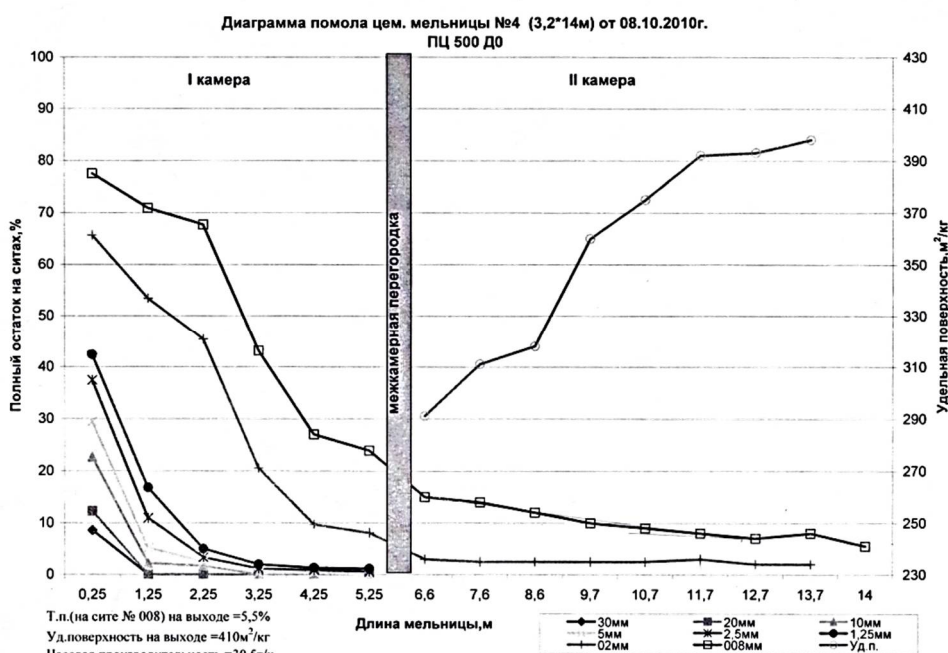


Рис. 1. Диаграмма помола

Основные результаты и выводы.

1. Предпринят новый подход к исследованию процесса измельчения материала в трубных мельницах, в основу которого положено применение не энергетических показателей процесса, как это общепринято в научно-технической литературе, а отношения масс взаимодействующих ингредиентов – мелющих тел и размалываемого материала.

2. Предложен механизм воздействия совокупности шаров мелющей загрузки на размалываемый материал в водопадном режиме в виде двух импульсов:

– импульса истирающего действия (ИИД), количественно равного кинетической энергии шаров в верхней точке отрыва от поверхности барабана;

– импульса ударного сжатия (ИУСа), возникающего в момент максимального контакта в нижней точке соприкосновения шаров с цилиндрической поверхностью барабана мельницы, равного отношению масс $m_{мт}/m_{рм}$.

3. Предложен способ повышения удельной энергии импульсов истирающего действия и ударного сжатия – применением плотной упаковки шаров в мелющей загрузке; плотная упаковка шаров концентрирует удельную массу мелющих тел в единице объема размалываемого материала и усиливает ИУС в 2 раза.

4. Для сохранения высокой энергии ИИД и ИУСа одновременно с быстрым измельчением необходимо увеличить скорость продвижения размалываемого материала по длине мельницы и его выгрузку, для чего следует и во второй камере тонкого измельчения организовать водо-

падный режим движения шаров с применением лифтерно-желобчатых бронеплит со спиральными дорожками, направленными по образующим барабана мельницы.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 14-41-08029 р_офи_м.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А., Закономерности измельчения и исчисления характеристики гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959. 437 с.

2. Бажанова О.И., Богданов В.С., Шаптала В.Г. Моделирование температурно-влажностного режима цементной мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №4. С. 91–95.

3. Севостьянов В.С., Михайличенко С.А., Ильина Т.Н., Маркидин А.А., Сиваченко Т.Л. Способы совершенствования измельчителей ударного действия на основе многостержневых рабочих органов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 87–90.

4. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск: ВО «Наука», 1993. 240 с.

5. Пирочкин В.З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация. С.-Пб.: Изд-во Центра профессионального обновления, 1999. 145 с.

6. Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Крыхтин П.С. Измельчение материалов в цементной промышленности. М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. 270 с.

7. Капалнец Е.Г. Взаимосвязь работы мельющих тел и футеровочных плит шаровых мельниц // Цемент и его применение. 2010. № 3. С. 80–81.

8. Пат. № 2477659 Российская Федерация, МКП В 02 С 17/20 Шаровая загрузка барабанной мельницы / В.Д. Барбанягрэ; заявитель и правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2010121271, заявл. 25.05.10; опубл. 20.03.13.

9. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 240 с.

10. Барбанягрэ В.Д., Смаль Д.В. Плотнейшая шаровая загрузка трубной мельницы и ее эффективность // ИнформЦемент. 2011. № 2(32). С. 49–56.

Barbanyagre V.D., Matveev A.F., Smal D.V., Moskvichyov D.S.

PHYSICAL AND TECHNICAL BASICS OF GRINDING MATERIALS IN PIPE MILLS

By using the ratio of the mass of grinding media to the mass of the grinding material in the laboratory it was studied the processes of grinding material in a ball mill. It was found the possibility of an intensification of the milling process as a result of the most dense ball load, which provides a high-energy grinding of the material due to the presence of two factors: the impulse of abrasion action (IAA) and impulse of impact compression (IC). In pilot tests it was achieved increasing the productivity of ball mill by 15–20 %.

Key words: dense loading, impulse of abrasion action, impulse of impact compression.

Барбанягрэ Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: xtsm@intbel.ru.

Матвеев Александр Фролович, кандидат технических наук, профессор, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: xtsm@intbel.ru.

Смаль Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: xtsm@intbel.ru.

Москвичев Дмитрий Сергеевич, научный сотрудник, кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: xtsm@intbel.ru.