

Г.В. ГУБИН, д-р техн. наук, **В.И. ГОЛОВАНЬ**,

Г.Г. ГУБИН, канд. техн. наук

(Украина, Кривой Рог, Государственное ВУЗ "Криворожский национальный университет")

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАРОВЫХ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ЗАПОЛНЕНИЯ

Постановка проблемы. На горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) основными потребителями энергии являются обогатительные фабрики – 44% общекомбинатских затрат [1], а самым энергоемким процессом на обогатительных фабриках является процесс измельчения: до 80% затрат энергии обогатительной фабрики. Для внедрения энергосберегающих процессов необходимо применение инновационных технологий. Одной из таких технологий является эксплуатация шаровых барабанных мельниц с высокой степенью заполнения шаровой загрузкой.

Анализ последних достижений. По различным методикам расчета величина передаваемой частицам руды кинетической энергии при падении шаров диаметром 60-125 мм достигает 0,3 кНм, усилие и напряжение в точке контакта шара и футеровки достигает 600 кН и 2500 МПа. Эта энергия в десятки раз превышает усилие необходимое для измельчения самых крепких частиц руды.

Целью данной работы является определение влияния степени заполнения помольной камеры барабанной шаровой мельницы шаровой загрузкой на снижение энергозатрат мельницы.

Изложение основного материала. При соударении шаров с футеровкой, друг с другом через слой измельчаемой руды и без него в поверхности контакта возникают пластические деформации. Глубина пластической деформации, замеренная по нормалям к поверхности шаров и футеровки, зависит от усилий, возникающих в месте контакта, и может быть определена через предел текучести материала шаров и футеровки σ_s и глубина наклепа h_s . Из шаров и футеровки были вырезаны образцы, по которым определялась глубина наклепа по твердости H_v , и предел текучести по диаграмме состояния шаров и футеровки. Исследования зависимости из теории пластичности определяли усилия, возникающие при измельчении в месте контакта [8].

Подставляя полученные данные по мельницам первой стадии измельчения МШР 36×40 получим, что усилия в контакте, вызывающие пластическую деформацию футеровки достигают 400-500 кН, т.е. почти вся энергия падающих шаров расходуется на пластическую деформацию.

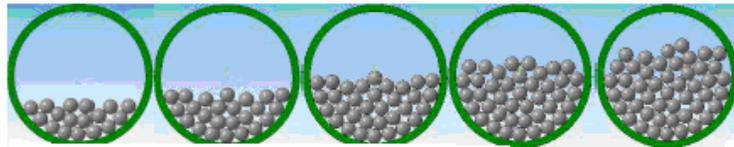
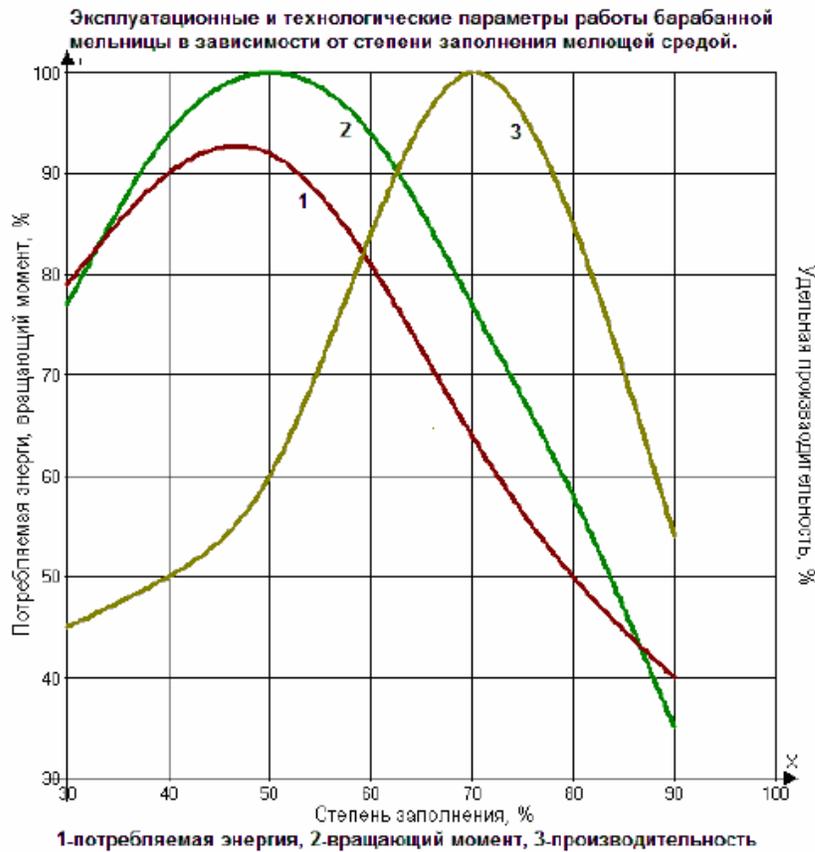


Рис. 1. Основные показатели работы барабанных мельниц при различной степени заполнения шаровой загрузкой

Также определялось временное сопротивление разрушению частиц криво-рождских железистых кварцитов размером 20 мм при статическом и динамическом измельчении, которое редко было больше 60 МПа. Усилие необходимое для разрушения частиц попадающих в зону контакта между шарами, шаром и футеровкой во всех случаях не превышало 15-20 кН. Определение усилия от падения шара по формуле Герца [9, 10] дает завышенные значения, поэтому максимальные усилия F , которые могут возникнуть в барабанной шаровой мельнице, где скорость соударения шаров может достигать 1,6-1,8 м/с, измерялась экспериментально. Допускалось, что при таких скоростях площадь пластического отпечатка поверхности контакта при ударе равна площади отпечатка при статическом сжатии равного усилия. Отсюда максимальное усилие имеет следующий вид:

Підготовчі процеси збагачення

$$F = 0,02 * d_{ш}^{1,92} V^n, кН, \quad (1)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шара, м.

Степень влияния скорости удара не столь значительна, т.к. при падении шара на слой руды $n = 0,61$, а при падении на футеровку $n = 0,74$, тогда, как показатель степени при диаметре шара равен 1,92.

Установлено, что при падении шаров диаметром 30-125 мм максимальное усилие в контакте достигает 500-600 кН, напряжение 2500 МПа. Такой высокий запас кинетической энергии шаровой загрузки является избыточным и приводит к большому расходу мелющих тел и футеровки в результате ударно-абразивного износа, ухудшаются параметры раскрытия рудных минералов и является причиной интенсивного шламообразования.

Проведем анализ измельчения единичной частицы методом теории упругости.

При измельчении разрушение частиц может происходить как со стороны поверхности от поверхностных напряжений, приводящих, как правило, к отделению небольших частиц, так и от максимальных напряжений, возникающих в середине тела частицы и приводящих к разрушению куска руды на несколько частей.

Разрушение частиц исследовалось путем раздавливания, истирания и удара. При *раздавливании* частиц действует сосредоточенная сила со стороны шара, т.к. частица меньше шара, то раздавливание цилиндрических частиц рассматривали двумя полуплоскостями. Частица состоит из хрупкого материала и находится в условиях близких к плоской деформации. В этом случае максимальные разрушающие напряжения находятся в центре частицы [11, 12]. При сложном напряженном состоянии хрупких материалов разрушение с удовлетворительной точностью описывает теория максимальных деформаций [12].

В случае раздавливания частиц в форме шара максимальные растягивающие напряжения возникают в точках расположенных в центре частицы [12].

Расчетным путем установлено, что разрушающие напряжения в хрупких шаровидных частицах составляют 60-100 МПа, при диаметре частицы 0,1-0,02 м, а разрушающие усилия будут соответственно равны $F_1 \geq 3,75-6,25$ кН и $F_2 \geq 15-25$ кН. В цилиндрических частицах диаметром 0,01-0,02 м при разрушающих напряжениях 60-100 МПа разрушающие усилия будут равны $F_1 \geq 4,28-7,14$ кН и $F_2 \geq 17,14-28,56$ кН.

Таким образом, при равных разрушающих нагрузках в шаровидной частице возникают большие разрушающие напряжения, значительно превышающие значения необходимые для разрушения частиц.

В *случае истирания* разрушение частиц происходит от контактных нагрузок, возникающих непосредственно между частицами, частицами и шарами, частицами и футеровкой. Это наиболее массовый вид разрушения по частоте актов воздействия.

Рассчитывали более общий случай контакта шаровидной частицы с полу-

пространством шара или футеровки. При действии произвольно направленной силы в контакте (нормальной силы и касательной, связанной с коэффициентом трения) напряжение в опасных точках рассчитывали по [13]. Тогда, если разрушающее напряжение равно 60-100 МПа, диаметр частицы 0,01-0,02 мм, $E_p=1 \cdot 10^{-5}$ МПа, то необходимые усилия разрушения в месте контакта будут равны: $F_{(y=0)}=0,136-0,656$ Н и 0,544-2,624 Н; $F_{(y=1)}=0,876-4,040$ Н и 3,504-10,5 Н. Отсюда следует, что для разрушения необходимо создать достаточно малое усилие, чтобы измельчать частицы в форме шара.

В случае *скольжения* частицы цилиндрической формы по шару разрушающее усилие в месте контакта, рассчитанного по [14], будут равны 1,908-5,3 Н 7,36-21,5 Н в центре контакта и 0,496-1,36 Н и 1,984-5,44 Н на границе контакта.

Проведенные экспериментальные исследования разрушения частиц показали удовлетворительную сходимость результатов для частиц в виде цилиндра и шара, погрешность составила 12%.

Таким образом, при измельчении наиболее энергоемким является разрушение от контактных нагрузок, когда разрушение в небольших объемах происходит при нагрузках выше одного Ньютона, и которые пропорциональны поверхности шара, в то время, как усилия раздавливания или разрушение от ударных нагрузок пропорциональны произведению диаметра шара и частицы.

Избыточность энергии падающих мелющих тел, их величина и форма сильно сказывается на интенсивности измельчения и в значительной степени определяет их расход.

В работах [14, 15] показано, что абразивный износ пропорционален величине работы выполняемой мелющими телами при измельчении. Величину потери массы шара можно записать следующим образом:

$$dQ/dt = \sqrt{D}d^3 \gamma * k * (5,5 + 0,424 + 0,2/\alpha), \quad (2)$$

где Q – масса шара, т; D – диаметр барабана мельницы, м; d – диаметр шара, м; γ – массовая плотность шара, т/м³; k – коэффициент пропорциональности; α – угол отрыва шара от футеровки, град.

Из анализа этой зависимости следует, что наибольшая скорость изнашивания приходится на ударные нагрузки. При малых коэффициентах заполнения мельницы шаровой загрузкой, когда преобладает ударное измельчение, более интенсивно разрушаются крупные фракции, измельчение мелких фракций несколько меньше. При высоких коэффициентах заполнения мельницы шаровой загрузкой, более интенсивно разрушаются мелкие частицы, что в целом приводит к значительному приросту производительности мельницы до 30-80% по исходному питанию, в зависимости от схемы измельчения, или росту на 12-15% удельной производительности по готовому классу крупности, что несомненно связано с увеличением количества мелющих тел и их общей площади поверхности. Снижение потребления энергии при высоких коэффициентах заполнения мельницы шаровой загрузкой до 35%.

Підготовчі процеси збагачення

Для проверки выдвинутых предпосылок были проведены лабораторные испытания. В [3] исследования зависимости эффективности тонкого помола от степени заполнения барабана мельницы шаровой загрузкой проводилось от 25 до 90% при сохранении остальных параметров неизменными. Очень низкие $\leq 30\%$ и высокие $\geq 80\%$ степени заполнения характеризуются резким снижением эффективности измельчения. В диапазоне 35-50% наблюдается небольшой рост интенсивности измельчения. Значительное увеличение скорости помола наблюдается при степени заполнения 70%, снижающемся при дальнейшем повышении этого параметра $\geq 80-90\%$. Последнее авторы объясняют уменьшением относительной подвижности шаров. В этой работе также установлена зависимость величины потребляемой энергии от степени заполнения мельницы. Так при степенях заполнения 30-40% наблюдается рост энергозатрат доходящий до максимума при степени заполнения 50%, а в области высоких коэффициентов заполнения (65-75%) наблюдалось существенное снижение энергозатрат, в 1,5 раза, которое авторы объясняют уменьшением момента сопротивления шаровой загрузки вращению мельничного барабана.

В июле 2013 года Академия горных наук Украины совместно с "Lins Construction Ukraine LLC" провели на лабораторной базе ПАО "Механобрчермет" эксперименты по уточнению влияния увеличения массы шаровой загрузки на мощность потребляемую электродвигателем шаровой барабанной мельницы. Исследования проводились на железистых кварцитах СевГОКа. Для проведения испытаний использовались шары 30-80 мм. В мельницу загружалась руда - 5+0 мм. Массовая доля твердого в мельнице составляла 75-80%. Для замера мощности потребляемой электродвигателем мельницы использовался счетчик активной энергии типа СА4У И672М, ГОСТ 25472-82.

Данные замеров мощности потребляемой шаровой барабанной мельницей, при различной степени заполнения шарами приведены в табл. 1. Как следует из приведенных данных, имеет место общее снижение потребляемой мощности на 25,76% при увеличении степени заполнения мельницы шарами с 35 до 75%.

Таблица 1

Мощность потребляемая лабораторной мельницей в зависимости от степени заполнения

| № опыта | Степень заполнения, % | Общая потребляемая мощность, кВт | Мощность холостого хода, кВт | Затраты энергии на движение загрузки мельницы, кВт |
|---------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 35,00 | 0,66 | 0,38 | 0,28 |
| 2 | 45,00 | 0,56 | 0,37 | 0,19 |
| 3 | 55,00 | 0,57 | 0,38 | 0,19 |
| 4 | 60,00 | 0,53 | 0,37 | 0,16 |
| 5 | 65,00 | 0,51 | 0,36 | 0,15 |
| 6 | 70,00 | 0,50 | 0,38 | 0,12 |
| 7 | 75,00 | 0,49 | 0,38 | 0,11 |

Данные об изменении количества класса -50+0 мкм при разной степени заполнения мельницы шарами приведены в табл. 2.

Массовая доля класса -50 мкм в продуктах при различных степенях заполнения мельницы шарами

| № опыта | Степень заполнения, % | Массовая доля класса -50 мкм, % | | |
|---------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | В исходной навеске, % | В измельченном продукте, % | Прирост класса -50 мкм, % |
| 1 | 35,00 | 30,4 | 41,0 | 10,6 |
| 2 | 45,00 | 30,4 | 49,2 | 18,8 |
| 3 | 55,00 | 29,8 | 50,4 | 20,6 |
| 4 | 60,00 | 29,8 | 51,4 | 21,6 |
| 5 | 65,00 | 29,8 | 52,6 | 22,8 |
| 6 | 70,00 | 29,6 | 48,2 | 18,6 |
| 7 | 75,00 | 29,6 | 48,6 | 19,0 |

При сравнении степени заполнения 45 и 65% видно, что производительность мельницы по классу минус 50 мкм повысилась на 21%.

Опытно-промышленные испытания на ЦГОКе в 1990 г. на магнетитовой руде Глееватского месторождения показали, что повышение степени заполнения мельницы МШР 36x40 шарами с 40 до 60% сопровождалось ростом общей с 83,7 т/ч до 105-115 т/ч и удельной производительности с 0,93 т/ч·м³ до 1,27-1,29 т/ч·м³. При этом наблюдалось снижение потребления электроэнергии на 25-33%.

Выводы

1. Наиболее важным последствием повышения степени заполнения барабанной шаровой мельницы шаровой загрузкой выше 40-50% является значительное повышение производительности измельчения и снижение расхода электроэнергии. Имеется область более эффективных, интенсивных, энергоэкономичных режимов работы внутримельничной загрузки.

2. Указанные режимы эксплуатации пригодны, как для мокрого, так и для сухого измельчения. Являясь более эффективными в плане интенсификации процесса измельчения и снижения энергопотребления, предлагаемые режимы позволяют снизить ошламование на 10-15% и увеличивают степень раскрываемости минеральных зерен.

3. Для использования этих режимов измельчения в промышленных условиях требуется конструктивные изменения (загрузочное устройство, разгрузочная горловина), это позволит устанавливать модернизированные барабанные мельницы на штатное место при минимальных капитальных затратах на реконструкцию фундаментов.

Список литературы

1. Губин Г.В. Ключевые проблемы горно-металлургического комплекса // *Металлургическая и горная промышленность*. – 2013. – №7. – С. 8-13.
2. Шестаков А.М., Джур В.А., Кляцкий В.И. Применение высоких коэффициентов заполнения барабанных мельниц для повышения эффективности измельчения окисленных руд // *Известия вузов. Горный журнал*. – 1990. – №1. – С. 123-125.

Підготовчі процеси збагачення

3. Ширяев А.А., Черный Л.М., Головань В.И. Кинетика тонкого измельчения железных руд и выбор параметров барабанных мельниц. // Горный журнал. – 1991. – №11. – С. 35-39.
4. Шестаков А.М., Губин Г.В. Повышение эффективности работы шаровых мельниц. // Бюл. науч.-техн. информ. Черная металлургия. – 1990. – №3. – С.43-44.
5. Шестаков А.М., Елисейев А.К., Губин Г.В., Шестаков А.А. Шаровая барабанная мельница. А.с. №1715409.
6. G.V. Gubin, Yeliseyev A.K. and Shestakov A.M. Resource Saving Technology of Comminution. XVIII International Mineral Processing Congress. Sydney, 23-28 May, 1993. – Pp. 1321-1322.
7. Губин Г.В., Шестаков А.А., Шестаков А.М. Энергосберегающие режимы работы барабанных мельниц // Разработка рудных месторождений. – 1996. – Вып. 59. – С.68-70.
8. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.Н. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
9. Динник А.Н. Избранные труды. – К.: Изд-во АНУССР, 1952. – Т. I. – 151с.
10. Шупов А.П. Ударное воздействие шаров в мельнице // Обогащение руд. – 1962. – №4. – С. 48-52.
11. Тимошенко С.П., Гурьер Д. Теория Упругости – М.: Наука, 1985. – 576 с.
12. Шоу. Хрупкое разрушение при сложном напряженном состоянии // Труды американского общества инженеров механиков. Сер Б: Конструирование в технологии машиностроения. – 1976. – №1. – С. 157-164.
13. Коровчинский М.В. Распределение напряжений в окрестности локального контакта упругих тел при одновременном действии нормальных и касательных усилий в контакте. // Машиностроение. – 1967. – №6. – С.85-86.
14. Кагельский Н.В., Добыгин М.Н., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1975. – 526 с.
15. Глаголев Н.Н. Выражение работы сил трения и износа. – М.: Наука, 1965. – С. 68-72.

© Губин Г.В., Головань В.И., Губин Г.Г., 2014

*Надійшла до редколегії 17.03.2014 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*