

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИВАЛКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Експериментально встановлено залежності продуктивності валкового млина від міцності гірських порід, ширини розвантажувального зазору, обертів вала млина і вібрації робочого органа. Визначено положення частинки в конусному млині у початковий момент її защемлення та руйнування.

RESULTS OF RESEARCHES ON A SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF A GRINDING MILL

Relations of productivity of a roll grinding mill to durability of rocks, width of a unloading backlash, revolutions of the arbour and vibrations of working body of a grinding mill are established experimentally. The position of a fragment in a conical grinding mill in the initial moment of its pinch and destructions is determined.

Для подготовки горной массы к дальнейшей переработке используются серийно выпускаемые валковые мельницы различных типов. Основным механизмом процесса измельчения в них является раздавливание сыпучей кусковой массы между барабаном и валками. При этом процесс раздавливания требует значительных усилий, а, следовательно, и больших затрат энергии для поддержания стабильности процесса. Учитывая большие распорные усилия в металлоконструкции мельницы, значительную кинетическую энергию вращающихся валков, мельницы представляют собой металлоемкую конструкцию с динамически напряженной кинематической схемой. Дальнейшее совершенствование этих машин требует снижения их металлоемкости и энергопотребления. Разработанная в ИГТМ НАН Украины внутривалковая конусная мельница [1] позволяет в значительной степени решить указанную техническую проблему. Конструктивная схема такой мельницы представлена на рис. 1, она состоит из рамы 1, на которой с помощью амортизаторов 2 установлена цилиндрическая оболочка 3 с внутренней конической поверхностью и расположенным в ней, соосно продольной оси, валом 4, связанным через лепестковую муфту с приводным валом 5 двигателя. На валу 4 установлены конические втулки 6 и 7, ориентированные меньшими основаниями друг к другу. Внешние конические поверхности втулок имеют многозаходную винтовую навивку 8 из высокотвердого материала с противоположным направлением навивки на каждой втулке и с одинаковым шагом. Втулки с навивкой образуют зазор с оболочкой и имеют уклон в сторону разгрузки измельченного материала. Между меньшими основаниями втулок 6 и 7, вдоль поперечной оси вала 4 в верхней части цилиндра расположена загрузочная камера 9. Разгрузочные щели 10 и 11 расположены по торцам оболочки, величина зазора которых регулируется продольным перемещением конических втулок 6 и 7 относительно вала 4. Мельница имеет две модификации, одна из которых имеет вибровозбудитель 12, который способствует сегрегации измельчаемого

материала в зазоре камеры 9, поворотные колебания корпуса увеличивают скорость движения материала, а возмущающая сила вносит динамическую составляющую при воздействии на измельчаемую горную массу.

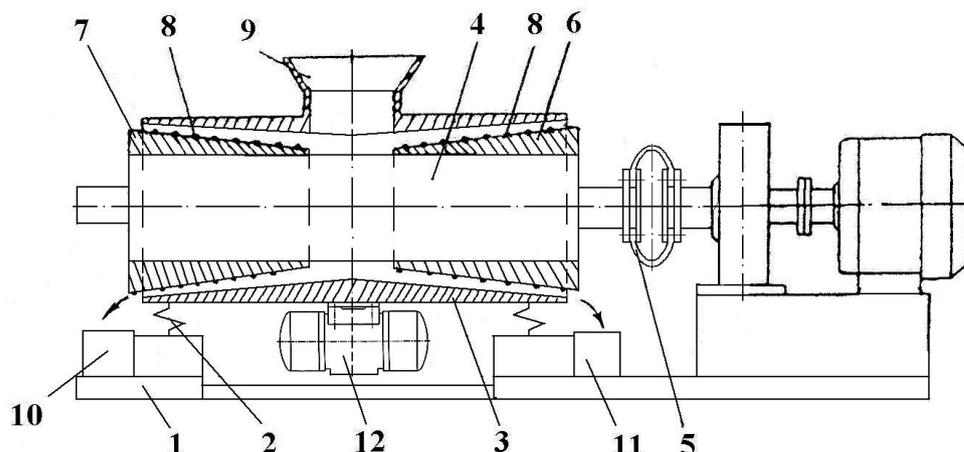


Рис. 1 – Конструктивная схема внутривалковой конусной мельницы

При создании мельницы был выполнен комплекс теоретических и лабораторных исследований [2-5] и установлен ряд преимуществ представленной конструкции конусной внутривалковой мельницы над обычными валковыми, которые заключаются в реализации сдвиговых деформаций при разрушении горной массы, что требует меньших усилий по отношению к раздавливанию сжатием и снижает металлоемкость конструкции [6]. При этом также увеличивается степень измельчения материала от большего к меньшему, вдоль всего конуса, на что затрачиваются значительно меньшие усилия, и пропорционально им обеспечивается снижение требований к запасам прочности металлоконструкции.

Экспериментальные исследования позволили установить существенно нелинейную зависимость производительности внутривалковой конусной мельницы от прочности измельчаемых пород, линейную зависимость от зазора разгрузочной щели и слабонелинейную зависимость от оборотов привода мельницы [2], а также затраты энергии на измельчение при различных оборотах двигателя [3]. Сделан сравнительный анализ внутривалковых мельниц серийного производства по удельной энергоемкости измельчения с внутривалковой конусной, который показал, что последняя, при равной производительности, имеет энергопотребление на 30-40 % меньше, в зависимости от прочности горной породы.

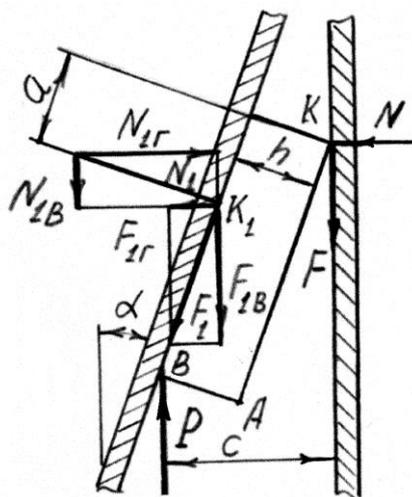
На основании аппроксимации экспериментальных зависимостей производительности мельницы от основных факторных признаков получена обобщенная математическая модель (1):

$$Q = 0,363 - 0,138\sigma + 0,0004\sigma^2 + 1,885\Delta \cdot 0,111\omega \quad (1)$$

где Q – производительность мельницы, кг/ч; σ – прочность измельчаемой породы, кг/мм²; Δ – размер разгрузочного отверстия, мм; ω – частота вращения вала привода, об/мин.

Коэффициент детерминации составил, $R^2 = 0,943$, т.е. 94,3 % вариации производительности мельницы объясняется факторными признаками, учтенными в данной модели. Статистика Фишера $F = 227,2$, что значительно больше критического значения. Модель может быть признана адекватной с высоким значением доверительной вероятности.

Для определения конструктивных параметров мельницы был выполнен анализ математического моделирования разрушения горных пород при деформации сжатия и удара, определены наиболее общие закономерности при разрушении [7]. Выполненные с участием автора исследования позволили построить в векторном виде схему сил, действующих на частицу с учетом сил трения, возникающих между частицей, с одной стороны, корпусом и конусом, с другой, – в камере внутривалковой конусной мельницы (рис. 2) [8-9]



F – сила трения между частицей и корпусом; F_1 – сила трения между частицей и конусом;
 N, N_1 – силы реакции, a – смещение (точнее, его предельное значение) реакции N_1 ;
 P – действующее усилие

Рис. 2 – Схема сил, действующих на частицу с учетом трения

При проецировании действующих на частицу сил на горизонтальную и вертикальную оси были получены условия равновесия частицы, из которых было найдено смещение a (2) [9]:

$$a = \frac{c + hf_1 \sin \alpha}{1 - f_1 \sin \alpha} \left[\frac{f \cos \alpha - f_1 \sin \alpha}{f \sin \alpha - \cos \alpha} \right] - f_1 h, \quad (2)$$

где f и f_1 – коэффициенты трения между частицей и корпусом и между частицей и конусом, соответственно.

Величину действующего усилия P можно определить для случая, когда

винтовая наплавка конуса толкает частицу, из следующей формулы (3) [9]:

$$P t = ES \frac{x t}{l \cos \alpha} = ES \frac{ns}{l \cos \alpha} t - t_0, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга материала частицы; S – площадь поперечного сечения частицы в плоскости, перпендикулярной направлению действия силы; n – число оборотов конуса в единицу времени; s – шаг навивки, t_0 – момент начала защемления частицы.

Определение силы действия и приложения разрушающих частицу сил позволяет рассмотреть задачи распределения сил и направление условий начального защемления измельчаемой частицы различной формы в условиях камеры конусной внутривалковой мельницы.

Конкретное положение частицы, при котором ее дальнейший поворот станет невозможным, зависит от формы частицы, по крайней мере – от формы поверхностей, прилегающих к корпусу и конусу. Для решения задачи измельчения частицы необходимо установить геометрический параметр, характеризующий начало процесса деформирования частицы. По мере измельчения частицы приобретают все более округлую форму, поэтому необходимо проследить, как будет выглядеть это крайнее положение частицы на некоторых примерах. Наиболее простая для анализа форма частицы – эллиптическая. В начальный момент защемления частица такой формы займет положение, изображенное на рис. 3.

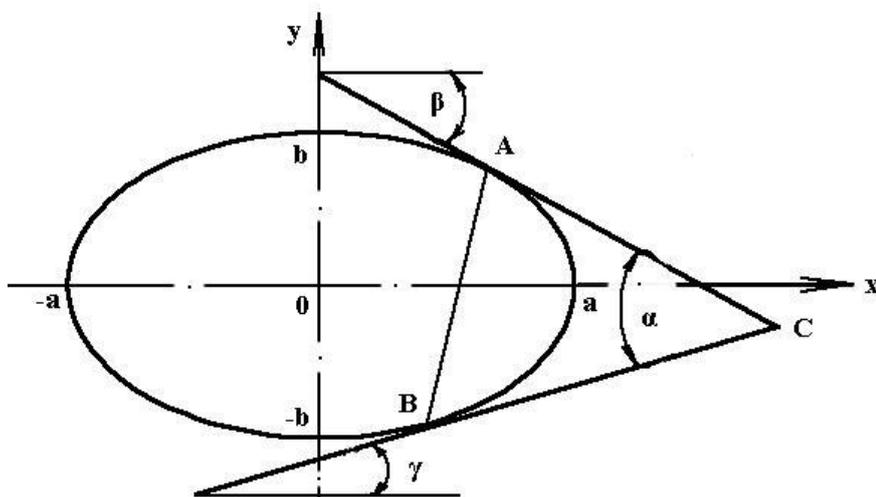


Рис. 3 – Схема касания эллиптической частицы между корпусом и конусом

Решением данной задачи является определение минимального расстояния между точками защемления частицы в валках внутривалковой конусной мельницы [10]. Положение частицы в фазе начального защемления, должно быть охарактеризовано двумя факторами:

- частица должна занять такое положение, в котором ее дальнейшее дви-

жение между корпусом и конусом без деформации станет невозможным;

– реакции корпуса и конуса должны быть направлены по нормальям к поверхности частицы в точках касания.

Вопрос отыскания устойчивого положения частицы в начальный момент ее защемления сводится к следующей задаче: заданы две связанные в единый контур гладкие кривые, к которым из одной и той же точки проведены две касательные, составляющие между собой угол α (рис. 3). Необходимо определить, при каких условиях расстояние между точками касания будет наименьшим. Такие две точки, обозначенные буквами A и B , и будут точками контакта частицы с корпусом и конусом в начальный момент защемления частицы. Минимальное расстояние между этими точками делает невозможным поворот частицы относительно любой из этих точек, ведь ее поперечные размеры не позволяют осуществлять ее поворот относительно любой из точек контакта.

Координаты точек A, B, C обозначим соответственно: $x_A; y_A$, $x_B; y_B$ и $x_C; y_C$. Касательная AC наклонена к оси x под углом β , касательная BC наклонена к оси x под углом γ .

В результате получено аналитическое выражение для определения минимального расстояния между точками защемления частицы конусом и корпусом внутривалковой конусной мельницы, которое определяет место приложения разрушающих усилий (4):

$$\begin{aligned}
 AB &= r \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) = b^2 \left(\frac{1}{\sqrt{b^2 + a^2 z^2}} + \frac{1 + z \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{b^2 (1 + z \operatorname{tg} \alpha)^2 + a^2 (\operatorname{tg} \alpha - z)^2}} \right) = \\
 &= b^2 \left(\frac{1}{\sqrt{b^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}} + \frac{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}}{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} \sqrt{b^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}} \right) = \frac{2b^2}{\sqrt{b^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$; $\operatorname{tg} \beta = z$; $z = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$; $\alpha = \beta + \gamma$;

$$r^2 = x_A - x_B^2 + y_A - y_B^2$$

Целью дальнейших исследований являлось определение влияния вибрации на производительность исследуемой конструкции мельницы, при этом прикладываемое вибрационное воздействие к корпусу мельницы обеспечивало его колебания вокруг горизонтальной оси. Испытывался лабораторный образец мельницы с производительностью до 20 кг/ч. Мощность (N) вибровоз-

будителя составляла 0,18 кВт при оборотах вала $n_{\max} = 1400$ об/мин и величина возмущающей силы $P_{\max} = 1800$ Н. Крупность исходного материала (гранит) составляла $-10+5,0$ мм. Обороты вибровозбудителя регулировались с помощью частотного регулятора. Эти исследования показывают, что изменение оборотов мельницы позволяет увеличить производительность на 20 %, а с применением вибровозбудителя – более чем в 2 раза, при разгрузочной щели $\Delta = 3; 5$ мм. При этом мощность привода вибровозбудителя в 6 раз меньше мощности привода мельницы.

Таким образом, разработанная в ИГТМ НАН Украины внутривалковая конусная мельница позволяет использовать сдвиговые деформации при разрушении горной массы, что требует меньших усилий по отношению к раздавливанию сжатием. Проведенные исследования позволили установить зависимость производительности мельницы от прочности измельчаемых пород, зазора разгрузочной щели и оборотов привода, создать обобщенную математическую модель, обосновать рекомендации по использованию дополнительных вибрационных возмущений рабочего органа. Также из полученных зависимостей следует, что величина смещения a не зависит от величины действующего усилия P – эти зависимости позволяют определять место приложения разрушающих усилий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. UA № 42114, МКІ⁷ В 02 С 2/00, В 02 С 15/00. Внутрішньовалковий конусний млин / Надутый В.П., Сухарев В.В. – № 200900094; Заявл. 05.01.2009, Опубл. 25.06.2009. Бюл. № 12.
2. Надутый В.П., Сухарев В.В. Определение зависимости производительности внутривалковой мельницы тонкого помола от ее параметров и прочности горной массы / Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. № 74. – С. 62-66.
3. Надутый В.П., Сухарев В.В. Влияние режимных, конструктивных параметров и прочности измельчаемой горной массы на технические показатели внутривалковой конусной мельницы // Научно-технический сборник НТУ “ХПИ” 2008. – Вып. № 38. – С. 18-22.
4. Надутый В.П., Эрперт А.М., Сухарев В.В. Идентификация результатов экспериментальных исследований зависимости производительности внутривалковой конусной мельницы от прочности горной массы и оборотов привода // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 10. – С. 61-63.
5. Надутый В.П., Эрперт А.М., Сухарев В.В. Определение зависимости производительности внутривалковой конусной мельницы от крупности исходной горной массы и размера разгрузочного отверстия // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 11. – С. 61-63.
6. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – С. 368-369.
7. Надутый В.П., Остапенко В.А., Сухарев В.В. Анализ модельных представлений разрушения горных пород в барабанной внутривалковой мельнице / Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – Вип. 3. – 2009. – С. 58-64.
8. Надутый В.П., Остапенко В.А., Сухарев В.В. Определение влияния формы частицы на распределение сил при измельчении в конусной валковой мельнице / Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – Вип. 4. – 2009. – С. 66-68.
9. Надутый В.П., Остапенко В.А., Сухарев В.В. Распределение сил при измельчении частицы горной массы в конусной валковой мельнице с учетом сил трения / Сб. Полтавского НТУ. – 2009. – Вып. № 39. – С. 44-53.
10. Надутый В.П., Остапенко В.А., Сухарев В.В. Оценка распределения сил при защемлении измельчаемой частицы в конусной валковой мельнице / Сб. науч. тр. НГУ. – Днепропетровск, 2009. – Вып. № 32. – С. 35-41.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Є.С. Лапином 07.08.09