

УДК 621.926

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

П.Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

Планетарные мельницы относятся к мельницам барабанного типа и являются высокоэффективными измельчающими агрегатами. Их исследования проводятся во многих странах, в том числе и авторами данной работы [1]. При измельчении материала на него действуют три разрушающих воздействия: раздавливанием, истиранием и ударом. Влияние каждого из указанных способов воздействия на эффективность измельчения оценивалось только косвенно, без расчета разрушающих напряжений. В связи с этим целью данной работы является количественная оценка разрушающего воздействия мелющих тел на измельчаемый материал.

В качестве объекта для аналитических исследований выбрана горизонтальная планетарная мельница с внешней обкаткой. Как и в большинстве исследованных ранее вариантов конструкций, радиус барабана принят $r = 0,1$ м, геометрический критерий $k = r/R = 0,5$, степень загрузки 50%. Поскольку экспериментальные исследования показали, что наибольшая эффективность достигается при центрифугальном режиме движения загрузки, то анализу подвергался только этот режим.

Для устойчивого центрифугального режима основной зоной является безотрывное движение, но ближе к центру барабана имеет место скольжение и даже отрыв мелющих тел с последующим их падением.

Ввиду того, что разрушающие напряжения в планетарной мельнице ранее не рассчитывались, принято решение по возможности установить их максимальные значения в характерных точках сегмента загрузки. Таковыми являются точки зоны безотрывного движения, соприкасающиеся со стенкой барабана, и точки по внешней границе двух других зон. Причем в зонах скольжения и отрыва напряжения в разрушаемом материале определялись только в одной точке, находящейся на пересечении границы зоны и прямой, проведенной через центр барабана, перпендикулярно водилу. Руководствуясь принципом достижения максимальных напряжений, в качестве основного технологического параметра принята максимальная угловая скорость барабана $\omega = 180$ рад/с.

С целью сравнения расчеты проводились и для угловой скорости $\omega = 90$ рад/с. Диаметр мелющих стальных тел принят $d = 18,5$ мм, час-

тиц измельчаемого материала – 1 мм. В качестве измельчаемого материала при аналитических исследованиях использовалось стекло с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 1000$ МПа. На начальном этапе исследовалась преобладающая в данном случае зона сжимающего воздействия. Сила давления мелющих тел на частицу материала, находящегося на поверхности барабана, рассчитывалась по предложенной модели [2] с учетом взаимодействия мелющих тел:

$$F = \frac{2}{3} \pi r_1^2 \rho_1 \left[\omega^2 \frac{(r_i + r_1)^2 - r_0^2}{2} + (r_i + r_1 - r_0) \left(\frac{\omega^2 k^2 R}{1 + k} \cos(\psi - \varphi) - g \cos \psi \right) \right] \quad (1)$$

где r_1 – радиус мелющего тела, м; ρ_1 – плотность измельчаемого материала, кг/м³; r_i – текущий радиус, м; r_0 – нулевой радиус, м; ω – угловая скорость барабана, рад/с; ψ , φ – текущий угол и угол поворота водила соответственно, град.

Расчеты сжимающих напряжений проводились при фиксированном положении барабана с углом поворота водила $\varphi = 45^\circ$. При этом определялось их значение по всему сегменту загрузки с интервалом $\psi = 15^\circ$. Результаты расчета свидетельствуют о том, что в пределах сегмента загрузки сжимающие напряжения изменяются циклически. Таким образом, даже в одном фиксированном положении процесс воздействия мелющих тел на материал не статичен. Естественно, в каждом новом положении силовое воздействие будет изменяться, и за счет этого обеспечится нестационарное динамическое нагружение материала. Из расчетов для угловых скоростях $\omega = 90$ рад/с и $\omega = 180$ рад/с было получено $\sigma_{\max} = 92,6$ МПа. Данное напряжение не позволит разрушить исследуемый материал (стекло).

Оценить ударное воздействие гораздо сложнее, чем раздавливающее. Здесь необходимо определить силу удара мелющего тела о частицу материала и площадь их контакта в момент удара.

Силу удара можно определить, используя модель удара Герца [3], согласно которой продольный удар двух тел может быть представлена моделью удара абсолютно твердых тел, взаимодействующих между собой в общем случае через нелинейный упругий элемент.

Используя данную модель можно получить максимальную силу удара [3]:

$$P_{\max} = k^{2/5} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot m \cdot v_0^2 \right)^{3/5}, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от кривизны поверхностей тел в точке контакта и свойств материала; m – приведенная масса, кг; v_0 – начальная скорость мелющего тела, м/с.

Коэффициент пропорциональности k определяется по формуле:

$$k = \frac{4}{3 \left[(1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2 \right]} \cdot \sqrt{\frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}}, \quad (3)$$

где r_2 —радиус кривизны частицы материала, м; μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона мелющего тела и материала соответственно; E_1, E_2 — модуль упругости мелющего тела и материала соответственно, МПа.

$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}, \quad (5)$$

где m_1, m_2 — масса мелющего тела и материала соответственно, кг.

Для определения площади контакта используем методику, основанную на теории Герца и опробованную Шараповым [4].

Площадь контакта S предлагается рассчитывать по формуле:

$$S = 2\pi \cdot r_1^2 - \pi \cdot r_2 \cdot \sqrt{4r_2^2 - r_2^2 \cdot h \cdot (2r_1 - h) \cdot \frac{4r_1 \cdot r_2 - 2r_1 \cdot h + 4r_2^2 - 4r_2 \cdot h + h^2}{r_2^2 \cdot (r_1 + r_2 - h)^2}}, \quad (6)$$

где h — глубина проникновения мелющего тела сферической формы в измельчаемый материал, м.

Глубину проникновения можно определить по формуле:

$$h = \left(\frac{15 \cdot m_1 \cdot m_2 (v_1 - v_2)^2 \cdot \sqrt{r_1 + r_2}}{16(m_1 + m_2) \cdot \sqrt{r_1 \cdot r_2}} \right)^{2/5} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/5}, \quad (7)$$

где v_1, v_2 — скорость мелющего тела и материала соответственно, м/с.

Предложенный алгоритм расчета ударных напряжений был реализован для всех восьми положений размольного барабана (рисунок 1).

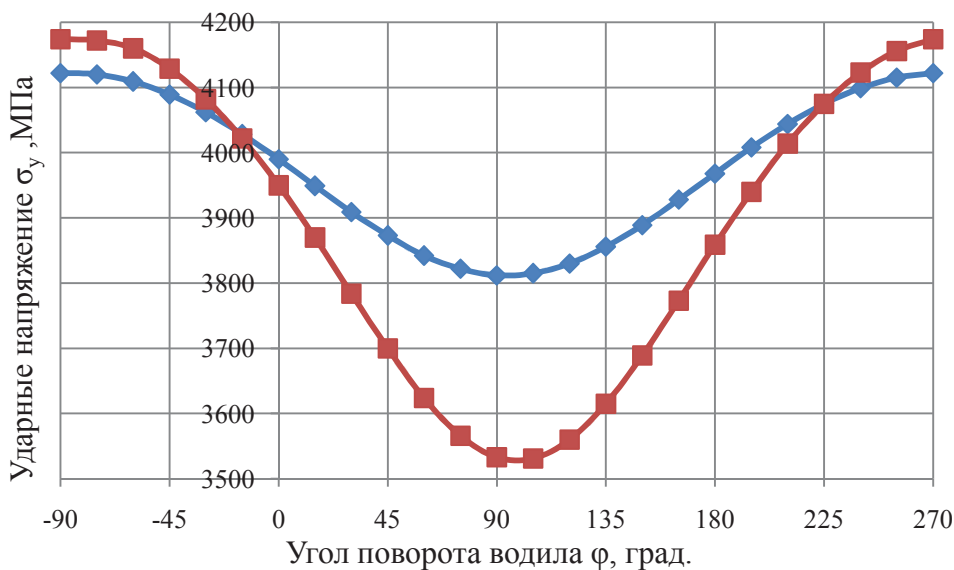


Рисунок 1– Изменение ударных напряжений

Расчетные зависимости (рисунок 1) показывают, что ударные напряжения значительно выше сжимающих и в несколько раз превышают предел прочности материала при таком виде нагружения. Некоторое снижение ударных напряжений при $\varphi = 90^\circ$ объясняется уменьшением воздействия на траекторию падения мелющего тела переносной инерционной силы, направленной горизонтально вдоль водила.

Методика расчета истирающего воздействия, основанного на аналогии процессов шлифования, предложена Ходаковым [5]. Согласно ей мелющее тело за счет силы давления внедряется в материал на глубину h и под действием тангенциального усилия срезает слой материала.

Глубина проникновения мелющего тела в частицу материала согласно с теорией Герца определялась по формуле:

$$h = \left[\frac{3 \cdot F(1 - \mu_2^2)}{4 \cdot E_2} \right]^{2/3} \cdot r_2^{-1/3}, \quad (8)$$

Расчеты для истирающих напряжений проводились для всех восьми положений размольного барабана. В результате было получено, что истирающее напряжение колеблется в пределе $\tau = 3190 \div 3192$ МПа и является достаточным для разрушения стекла.

Таким образом в работе сделана попытка увязать механику движения мелющих тел с их разрушающим воздействием на измельчаемый материал. Показано, что разрушение материала (стекла) возможно только при ударном и истирающем воздействии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Вайтехович, П.Е. Анализ моделей относительного движения мелющих тел в планетарной мельнице / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семенов, Г.М. Хвесько // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 167–171.
3. Манжосов, В.К. Модели продольного удара / В.К. Манжосов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 160 с.
4. Шарапов, Р. Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла: авто-реф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Р. Р. Шарапов; Белгородский гос. технол. ун-т. – 2009. – 38 с.
5. Ходаков, Г. С. Механизм абразивного шлифования стекла / Г.С. Ходаков // Оптико-механическая пром-сть. – 1985. – № 5. – С. 31–36.