

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ

kyudin@mail.ru

В статье автором предлагается методика определения оптимальных воздействий мелющих тел на измельчаемый материал в шаровых мельницах на основе лабораторных испытаний и моделирования ударных и истирающих воздействий мелющих тел на единичные частицы материала.

Ключевые слова: математическое моделирование, шаровая мельница, гранулометрический состав, ударные воздействия, истирающие воздействия.

Моделирование – воспроизведение свойств исследуемого объекта в специально построенной модели. Посредством моделирования могут решаться различные задачи по модернизации конкретного оборудования и производства в целом.

В настоящее время возрастает значение математического моделирования и, в частности, моделирования процессов разрушения материалов в шаровых барабанных мельницах. Большой опыт использования шаровых мельниц позволяет позиционировать их в качестве основных помольных агрегатов. Моделирование предопределяет разумный компромисс между сложностью моделей и их детерминированностью, с одной стороны, и прогностическими возможностями и простотой численного эксперимента, с другой.

Необходимо создание таких условий измельчения материала, при которых обеспечивается выпуск конечного продукта с заданным гранулометрическим составом без переизмельчения при минимально необходимых энергиях разрушения частиц исходного материала.

Определение оптимальных воздействий мелющих тел на измельчаемый материал возможно в лабораторных условиях при моделировании воздействия мелющих тел и создания максимально приближенных к ним воздействий в промышленных мельницах для исключения недоизмельчения и переизмельчения.

Объектом исследования является процесс разрушения частиц материала. Несмотря на множество теорий разрушения (В.М. Финкель, А.А. Гриффитс, И. Брах, Р.Т. Хукки, Р.И. Чарльз) [1], применение теории разрушения единичных частиц материала в шаровой барабанной мельнице значительно ограничивалось отсутствием информации о характере и величинах нагрузок, действующих на них.

Режимы работы мелющей загрузки мельницы, при которых материал измельчается за

счет удара, истирания, раздавливания являются с точки зрения энергетического воздействия мелющих тел на измельчаемый материал далеко не оптимальными.

Для повышения эффективности измельчения материалов в мельницах требуется решение двух задач: определения оптимальных параметров воздействия мелющих тел на частицы материала и создание таких режимов работы мелющей среды, при которых обеспечиваются эти оптимальные воздействия.

В идеальном случае получаемые регрессионные модели должны включать в себя параметры, которые отражают характерные физические свойства измельчаемого материала и шаровых мельниц. Только в процессах, таких, как единичное ударное воздействие на монослой идентичных частиц при исключении повторного дробления осколков может быть получена информация о разрушении измельчаемого материала в целом.

При исследовании истирания исследуемая трибологическая система должна рассматриваться как подвергаемый нагрузке комплекс, включающий контртело, индентор и промежуточный материал. В качестве контртела и индентора выступают или шары, или футеровка барабана мельницы и шар, а в качестве промежуточного материала - клинкер.

С точки зрения эффективности работы помольного агрегата наиболее важен контроль тонкости помола и определения фракционного состава получаемого продукта. В качестве выходной характеристики экспериментальных исследований был принят фракционный (гранулометрический) состав подвергнутых ударному и истирающему воздействию частиц клинкера ЗАО "Белгородский цемент". Для определения гранулометрического состава получаемого продукта применялся ситовой (весовой) анализ.

Получив для каждой точки плана эксперимента значения остатков на ситах, целесообразно

но использовать значения характеристического размера зерна (d') и коэффициент однородности (n) в качестве комплексных параметров, характеризующих разрушение частиц материала.

Продукты измельчения с хорошей степенью точности описываются уравнением Розина - Раммлера – Беннета:

$$R = 100 \cdot \exp\left(-\left(\frac{d}{d'}\right)^n\right) \quad (1)$$

где R - остаток на сите с размером ячеек d , %;

$$d' = 21.605 - 8.277X_1 - 10.214X_2 + 11.634X_3 - 4.887X_4 - 2.023X_1^2 + 9.697X_2^2 - 5.571X_3^2 - 7.707X_4^2 + 6.071X_1X_2 - 7.501X_1X_3 + 5.983X_1X_4 - 5.788X_2X_3 + 4.977X_2X_4 - 6.802X_3X_4$$

$$n = 0.563 + 0.023X_1 - 0.001X_2 + 0.018X_3 + 0.012X_4 + 0.064X_1^2 + 0.039X_2^2 + 0.105X_3^2 + 0.032X_4^2 - 0.020X_1X_2 + 0.005X_1X_3 - 0.019X_1X_4 - 0.028X_2X_3 + 0.024X_2X_4 + 0.029X_3X_4$$

Уравнения регрессии второго порядка в нормированном виде для d' и n при истирающем воздействии (X_1 - сила нормального давления шара на частицу клинкера; X_2 - угло-

d' и n - параметры, значения которых определяются свойствами измельчаемого материала и условиями измельчения. При прочих равных условиях d' и n зависят от физико-механических свойств клинкера, которые отражаются на его измельчаемости.

Уравнения регрессии второго порядка в нормированном виде для d' и n при ударном воздействии (X_1 - высота падения шара; X_2 - диаметр шара; X_3 - размер частиц клинкера; X_4 - объемная масса клинкера):

вая скорость вращения шара; X_3 - объемная масса клинкера; X_4 - размер частиц; X_5 - время истирания):

$$d' = 0.138 - 0.002X_1 - 0.002X_2 + 0.011X_3 + 0.003X_4 - 0.011X_5 + 0.002X_1^2 - 0.011X_2^2 + 0.002X_3^2 + 0.023X_4^2 + 0.014X_5^2 + 0.004X_1X_2 + 0.019X_1X_3 - 0.002X_1X_4 - 0.007X_1X_5 - 0.006X_2X_3 - 0.008X_2X_4 + 0.015X_2X_5 + 0.022X_3X_4 - 0.001X_4X_5$$

$$n = 1.084 - 0.041X_1 - 0.049X_2 + 0.078X_3 + 0.055X_4 - 0.077X_5 + 0.033X_1^2 - 0.053X_2^2 + 0.018X_3^2 + 0.139X_4^2 + 0.054X_5^2 + 0.017X_1X_2 + 0.076X_1X_3 - 0.031X_1X_4 + 0.048X_1X_5 - 0.032X_2X_3 - 0.053X_2X_4 + 0.183X_2X_5 + 0.191X_3X_4$$

Для построенных уравнений регрессии была установлена адекватность полученных моделей.

Далее определяются зависимости d' и n от энергетических характеристик процесса разрушения частиц материала.

В общем случае кинетическая энергия при ударном воздействии на частицу клинкера равна

$$E_y = \frac{\pi \cdot g}{6} \cdot \rho_0 \cdot D^3 \cdot H, \quad (2)$$

$$d' = 12.847 - 3.224 \cdot E_y + 6.706 \cdot d - 0.478 \cdot p + 1.926 \cdot E_y^2 - 1.963 \cdot d^2 - 4.099 \cdot p^2 - 1.1 \cdot E_y \cdot d - 0.351 \cdot E_y \cdot p - 1.135 \cdot d \cdot p \quad (3)$$

$$n = 0.647 + 0.003 \cdot E_y + 0.011 \cdot d + 0.016 \cdot p + 0.024 \cdot E_y^2 + 0.091 \cdot d^2 + 0.019 \cdot p^2 - 0.017 \cdot E_y \cdot d + 0.01 \cdot E_y \cdot p + 0.03 \cdot d \cdot p$$

При истирающем воздействии на частицу энергия определяется как работа силы трения, зависящая от коэффициента трения (f), пути фрикционного контакта (S) и контактного давления (P). Так как работа по истиранию равна энергии $E_{и}$, израсходованной на измельчение путем истирания, то

$$E_{и} = f \cdot \omega \cdot t \cdot \frac{D}{2} \cdot P, \quad (4)$$

где P , ω , t - первый, второй и пятый факторы в пятифакторном эксперименте по истирающему разрушению частиц клинкера.

Для рассчитанных в каждой точке плана эксперимента значений энергии взаимодействия

при истирании $E_{и}$ были получены уравнения квадратичной регрессии d' и n в зависимости

от $E_{и}$, d , ρ (в нормированных величинах):

$$d' = 0.135 - 0.0065 \cdot E_{и} + 0.0086 \cdot \rho - 0.0146 \cdot d + 0.013 \cdot E_{и}^2 + 0.009 \cdot \rho^2 + 0.0009 \cdot d^2 + 0.014 \cdot E_{и} \cdot \rho - 0.0073 \cdot E_{и} \cdot d + 0.013 \cdot \rho \cdot d \quad (5)$$

$$n = 0.988 - 0.073 \cdot E_{и} + 0.088 \cdot \rho + 0.045 \cdot d + 0.122 \cdot E_{и}^2 + 0.027 \cdot \rho^2 + 0.148 \cdot d^2 + 0.052 \cdot E_{и} \cdot \rho - 0.059 \cdot E_{и} \cdot d + 0.167 \cdot \rho \cdot d$$

Представленная методика позволяет получить зависимости параметров гранулометрического состава продуктов разрушения частиц клинкера от энергетических характеристик воздействия мелющих тел и двух параметров исходного материала – размера частиц клинкера и их объемной массы.

Поскольку целью оптимизации является определение минимально необходимых энергий

для измельчения частиц материала, то для определения минимально необходимых энергий ударного и истирающего воздействий на частицы материала с различным размером d , учитывая характер зависимостей $d'(E_y)$, $d'(E_{и})$ и наличие у них минимумов, найдем значения $E_{y \text{ мин}}$ и $E_{и \text{ мин}}$ в зависимости от размера частиц d . Для этого возьмем частные производные d' по d :

$$\begin{aligned} \frac{\partial d'(E_y)}{\partial d} &= 6.706 - 2 \cdot 1.963 \cdot d - 1.1 \cdot E_y - 1.135 \cdot \rho \\ \frac{\partial d'(E_{и})}{\partial d} &= -0.0146 + 2 \cdot 0.0009 \cdot d - 0.0073 \cdot E_{и} + 0.013 \cdot \rho \end{aligned} \quad (6)$$

и приравняем их к нулю, так как в точке экстремума (в нашем случае - минимум) производная обращается в ноль. Получим следующие линейные зависимости $E_{y \text{ мин}}$ и $E_{и \text{ мин}}$ от изменения d :

$$\begin{aligned} E_{y \text{ мин}} &= \frac{6.706 - 3.926 \cdot d - 1.135 \cdot \rho}{1.1} \\ E_{и \text{ мин}} &= \frac{-0.0146 + 0.0018 \cdot d + 0.013 \cdot \rho}{0.0073} \end{aligned} \quad (7)$$

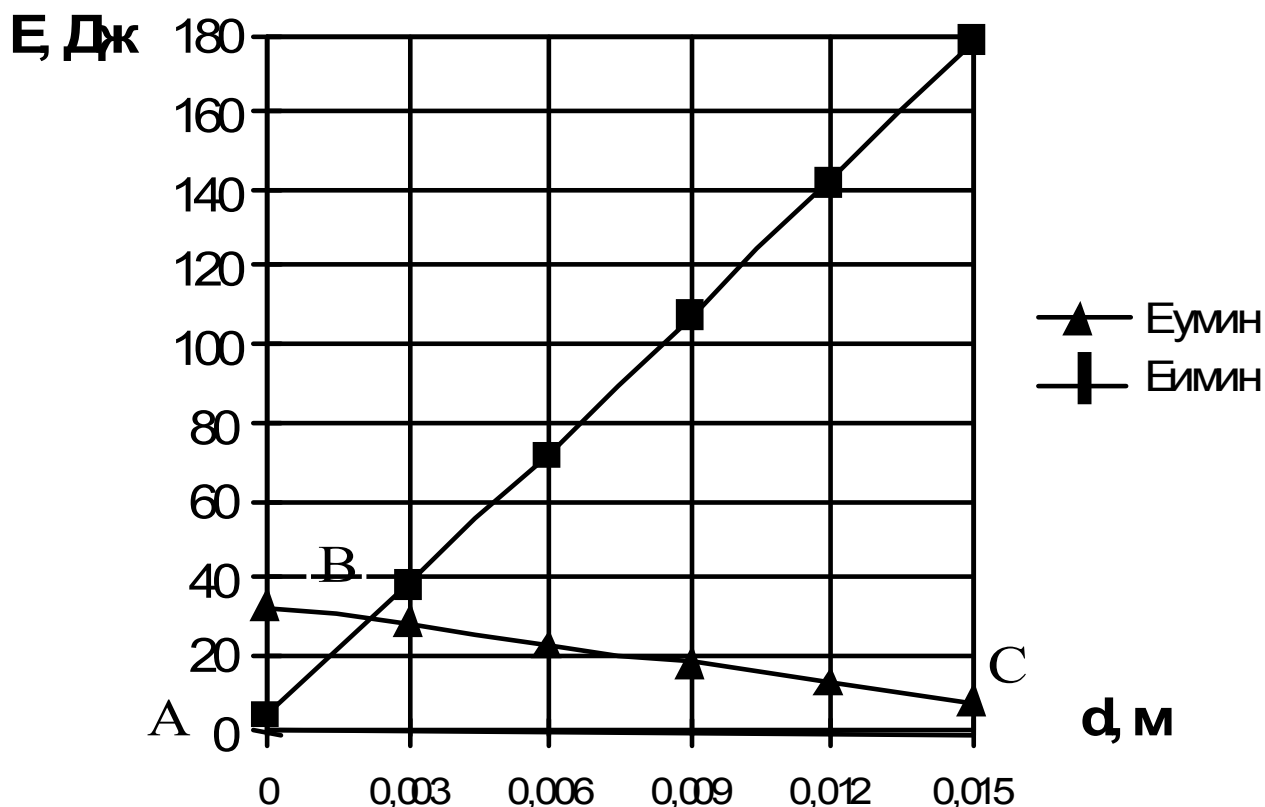
Графически зависимости $E_{y \text{ мин}}$ и $E_{и \text{ мин}}$ представлены на рисунке 1 для случая нормированного значения $\rho=0$.

Как следует из рисунка 1, существует граничное значение размера частиц d_r (точка В) такое, что частицы размером $d < d_r$ эффективно измельчаются истиранием (участок АВ), а частицы размером $d > d_r$ - ударом (участок ВС). Полученные зависимости полностью соответству-

ют известному положению о том, что мелкие фракции эффективнее измельчаются истиранием, а крупные - ударом.

В исходном материале присутствуют частицы разных размеров, а гранулометрический состав обычно характеризуется процентным содержанием нескольких классов, определим для каждого класса среднее значение диаметра частиц как полусумму граничных значений класса. А затем по линейным зависимостям $E_{и \text{ мин}}(d)$ и $E_{y \text{ мин}}(d)$ (см. рисунок 1) определяется для каждого $d_{\text{ксп}}$ значения энергии взаимодействия.

На основе этих данных получается математическая модель гранулометрического состава продуктов измельчения. Используя ее совместно с математической моделью многофазного цикла движения загрузки мельницы [2], возможно определение оптимальных конструктивно – технологических параметров шаровых мельниц.

Рисунок 1. Зависимость энергий взаимодействия ($E_{у\text{ мин}}$ и $E_{и\text{ мин}}$) от d

При этом для математической модели многофазного цикла движения загрузки мельницы в качестве входных факторов (лабораторный вариант) выбраны следующие: радиус барабана мельницы, коэффициент заполнения барабана мельницы, радиус шара, относительная скорость вращения барабана, коэффициент трения, коэффициент восстановления.

Разработанная методика определения оптимальных воздействий мелющих тел на измельчаемый материал в совокупности с математической моделью многофазного цикла движения мелющих тел позволяет оптимизировать режимы работы загрузки и конструктивно-технологические параметры работы мельниц с учетом физико-механических свойств конкрет-

ного измельчаемого материала и требований к гранулометрическому составу продуктов измельчения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юдин, К.А. Оптимизация работы шаровых барабанных мельниц с учетом разрушения частиц измельчаемого материала. / К. А. Юдин - Белгород, 1999. - 158с.
2. Юдин, К.А. Снижение энергоемкости процесса измельчения в шаровых мельницах / Н.Д. Воробьев, К.А.Юдин // Научно-техн. журнал. Материалы Международного конгресса "Современные технологии в ПСМ и стройиндустрии", - Белгород, 2003. - С.86-91.