

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ СРЕД ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Сартаков

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Рассмотрен процесс измельчения тонкодисперсных материалов, представлен расчёт энергии измельчения с позиций механики виброизмельчительного процесса, установлена взаимосвязь между параметрами виброизмельчителей и энергией измельчения закономерности движения, на основе чего предложена методика обоснования параметров режимов работы вибрационных измельчителей.

Ключевые слова: *измельчение, дисперсность, агрегация, энергонапряжённость, мельющие тела, интенсификация.*

Качество получения строительных материалов зависит от тонкости структуры компонентов, участвующих в их образовании. Поэтому очень важным фактором при получении таких материалов являются их необходимые физико-механические свойства. Это обеспечивается путём механической активации.

Как показала практика, наиболее распространённым технологическим оборудованием для активации тонкодисперсных сред с помощью механического диспергирования являются аппараты ударного и ударно-истирающего действия.

Основной способ измельчения этих аппаратов – удар, сочетающийся с частичным истиранием, раздавливанием. Принцип работы мельющих тел основан на взаимодействии не только с рабочим продуктом, но и друг с другом. Это дает возможность качественно обработать материал, что проявляется в его активированной тонкоизмельчённой структуре. Мельницы ударно-истирающего действия имеют некоторые преимущества перед другими измельчителями: низкую металлоёмкость, высокую производительность и степень измельчения, меньший удельный расход энергии. Однако измельчители ударно-истирающего действия предназначены для работ с материалами малой и средней твердости, а при работе таких машин с более твердыми материалами происходит быстрый износ их рабочих органов, в этом случае необходимы пути решения, направленные на увеличения ресурсов использования таких органов. Это можно осуществить:

1) созданием простых и быстро заменяющихся основных рабочих органов, имею-

щих высокий коэффициент использования материала рабочего органа;

2) применением специальных износостойких сплавов для рабочих органов.

Кроме того, постоянно разрабатываются новые конструкции мельющих тел, с целью увеличения их срока службы и получения качественного продукта, также проводятся решения инженерных задач по интенсификации процесса измельчения, связанных с изменением формы корпусов мельниц, изменением конструкций и расположением внутренних элементов машин: решеток, роторов, дополнительных вставок и т. д.

Одним из главных недостатков, снижающим эффективность работы таких машин – отсутствие гибкости режимов в зависимости от свойств измельчаемого материала, поэтому каждый измельчитель работает только в узком диапазоне дисперсных свойств материала, кроме того, совокупность таких материалов для конкретной машины очень ограничена. В связи с этим производственным структурам приходится создавать в технологическом цикле несколько этапов измельчения материалов. Однако это требует большого количества помольного оборудования, усложняет технологию и при этом растут материальные и энергетические затраты на производство, снижается производительность процессов, и в конечном счете повышается себестоимость готовой продукции. Таким образом, возникает необходимость в поисках универсального, с низкой энергоёмкостью помольного оборудования, которое бы позволило снизить вышеуказанные затраты. Такие аппараты должны иметь высокие скоростные характеристики, которые заключаются не

только в увеличении скорости движения, но и степени сложности перемещений мелющих тел.

Известно, что степень (класс) сложности перемещений определяется сочетанием координатных составляющих поступательного и вращательного движений. Различают 6 классов движения. Кроме того, движения могут изменяться во времени. Следовательно, по типу составляющие движения подразделяются на поступательные, вращательные, свободные, а по видам – на постоянные, периодические и независимо изменяющиеся. Число степеней воздействия рабочих органов на перерабатываемую среду определяется сочетанием видов и типов возможных движений в рабочей машине [1].

Как показала практика, количество способов воздействия в эксплуатируемых измельчителях очень мало по сравнению с теоретически возможными способами. Из этого можно заключить, что необходимо создавать и совершенствовать принципиально новое измельчительное оборудование, т.к. при более свободных передвижениях рабочих органов машины процесс измельчения идет эффективнее. Поэтому для интенсификации процесса необходимо иметь такой аппарат, чтобы движение шаров в нем были с высокими степенями свободы, при этом затраченная энергия будет использована по возможности максимально.

Анализируя требования, предъявляемые к современным измельчительным аппаратам, можно заключить, что среди существующих измельчителей ударного и ударно-истирающего действия наиболее им соответствуют вибрационные измельчители. В вибрационных мельницах можно получить не только сложное движение, но и разнообразие скоростных режимов, позволяющих плавно регулировать характер измельчения. Благодаря этому растет диапазон размеров измельчаемых частиц материала. Измельчители такого типа способны получить материал с необходимыми свойствами, однако при этом степень измельчения ограничивается константой, связанной с агрегативностью материала (новообразования, появляющиеся в результате наклепа), что затормаживает процесс измельчения. В результате чего, происходит обратное явление, т.е. крупность частиц материала начинает возрастать (рисунок 1) и происходит «отказ» аппарата молоть дальше, что указывает на необходимость создания рабочих режимов, которые обеспе-

чивали бы эффективность обработки измельчаемых материалов.

Возникает задача в оценке и правильности выбора таких режимов с учётом характеристик виброизмельчителей. Для этого предварительно учитываются прочностные характеристики материала.

Прочность агрегатов определяется

$$\sigma_a = \sigma_T \cdot n_s \cdot Z \cdot f, \quad (1)$$

где σ_T – теоретический предел прочности; n_s – количество частиц на поверхности; Z – количество точек контакта частицы с соседними частицами; f – площадь контакта между частицами.

Площадь контакта f определяется по следующей зависимости

$$f = \pi \cdot \delta^2 \cdot \frac{1}{\delta}, \quad (2)$$

где δ – средний размер частицы; l – расстояние между частицами (рисунок 2).

Число частиц n_s , расположенных на единицу поперечного сечения f

$$n_s = \frac{\Delta \mu_v}{\pi \cdot \delta^2}, \quad (3)$$

где μ_v – объёмная концентрация твёрдых частиц.

С учетом (2) и (3) прочность агрегатов запишется

$$\sigma_a = \sigma_t \cdot \pi \cdot \delta^2 \cdot \left(\frac{l}{\delta}\right) \times \frac{4 \cdot \mu_v \cdot Z}{\pi \cdot \delta^2}. \quad (4)$$

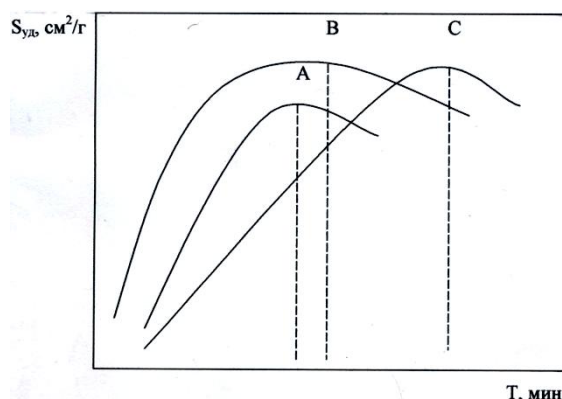


Рисунок 1 – Зависимость изменения дисперсности материала (удельной поверхности) от времени измельчения

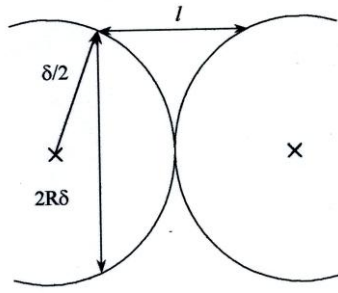


Рисунок 2 – Контакт 2-х частиц при помоле

Сила разрушения агрегатов определяется как

$$N \geq \sigma_a \cdot S, \quad (5)$$

где S – поверхность частицы

Дополнительную энергию измельчения для разрушения агрегатов можно оценить величиной изменения параметров вибромельницы, в конечном счёте, кинетической энергией при ударе мелющего тела (шара) по измельчаемому материалу.

Известно, что разрушение частиц материала происходит в том случае, когда они оказываются в зоне контакта между мелющими телами, либо между мелющими телами и футеровкой мельницы. В то же время процесс измельчения определяется силовыми (энергетическими) параметрами взаимодействия мелющих тел. Поэтому важно определить распределение энергopotенциала и оценить энергию, подводимую к измельчённому материалу. Позволят это сделать приведённые ранее рассуждения о кинематике и динамике мелющих тел [2]. При столкновении шара со стенкой корпуса мельницы, энергия взаимодействия запишется следующим образом

$$\Delta E_i^\delta = \Delta E_{in}^\delta + \Delta E_{ir}^\delta, \quad (6)$$

где ΔE_i^δ – изменение кинетической энергии шара i -го слоя при ударе о корпус мельницы; ΔE_{in}^δ – часть кинетической энергии, расходуемая на удар (раздавливание) материала; ΔE_{ir}^δ – часть кинетической энергии, расходуемая на истирание материала.

Теперь, применительно для случая взаимного расположения мелющих шаров и вибрационной плоскости, можно выразить составляющие уравнения (6)

$$\Delta E_{in}^\delta = \frac{m_i}{2} (g_{iy}^2 - U_{iy}^2), \quad (7)$$

$$\Delta E_{ir}^\delta = \frac{m_i}{2} (g_{ix}^2 - U_{ix}^2) + \frac{I_i}{2} (W_i'^2 - W_i^2), \quad (8)$$

где m_i и I_i – масса и момент инерции шара; g_i, u_i, w_i, w_i' – скорости, определяемые с учётом совместного решения уравнений вибрационных колебаний и теории удара.

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{m_1(1+f)(-A_x \cdot \omega \sin(\omega t - \varphi_x)) + (m_2 - f m_1) u_{2x}}{m_1 + m_2}, \\ v_{1y} &= \frac{m_1(1+R)(A_y \cdot \omega \cos(\omega t - \varphi_y)) + (m_2 - R m_1) u_{2y}}{m_1 + m_2}, \\ w_1' &= \frac{I_1(1+f)(-\frac{A_x}{\rho_w} \sin(\omega t - \varphi_x)) + (I_2 - f I_1) \frac{u_{2x}}{\rho_w}}{m_1 + m_2}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где ω – частота колебаний, A_x, A_y – амплитуды колебаний вдоль осей вибрирующей плоскости, R, f – коэффициенты восстановления удара и трения, m_1, m_2 – массы виброплоскости и шарового слоя, ρ_w – радиус слоя шаровой загрузки.

При столкновении мелющих тел друг с другом энергобаланс запишется

$$\Delta E_{ij}^s = \Delta E_{ijn}^s + \Delta E_{ijr}^s, \quad (10)$$

где ΔE_{ij}^s – изменение кинетической энергии i -го шара при соударении с j -ым шаром; ΔE_{ijn}^s – часть кинетической энергии, расходуемая на удар (раздавливание) материала; ΔE_{ijr}^s – часть кинетической энергии, расходуемая на истирание материала.

Аналогично кинетическая энергия соударения 2-х мелющих шаров в вибрирующей плоскости определяется

$$\Delta E_{ijn}^s = (U_{iy} - g_{iy})^2 \frac{m_i}{2} + \frac{m_j}{2} (g_{jy} - U_{jy})^2, \quad (11)$$

$$\Delta E_{ijr}^s = \frac{m_i}{2} (U_{ix} - g_{ix})^2 + \frac{J}{2} (W_i - W_i')^2 + \frac{m_j}{2} (g_{jx} - U_{jx})^2 + \frac{J_j}{2} (W_j' - W_j)^2. \quad (12)$$

Процесс интенсификации измельчения в вибрационных мельницах во многом зависит также и от многочастотного воздействия мелющих тел на материал.

Точно оценить такое воздействие достаточно сложно, поэтому предлагается при рас-

чѐтах режимов работы предлагается использовать статистические закономерности, т.е. учитывая вероятность импульсных воздействий на измельчаемую частицу или их совокупность.

Статистические закономерности позволяют определить среднюю величину частоты следования импульсов, что дает возможность оценить влияние скорости мелющих шаров на кинетику измельчения.

Предполагая, что число следования импульсов в части объема помольной камеры для частиц одинаково и распределение скоростей шаров также неизменно, можно утверждать, что однородность процесса во времени не изменится. Тогда вероятности разрушения частиц материала будут распределяться по закону Пуассона

$$P(k) = \frac{(\bar{f} \tau)^k}{k!} e^{-\bar{f} \tau}, \quad (13)$$

где $\bar{f}$ – средняя частота следования импульсов; τ – суммарная продолжительность импульсов; k – число воздействий на частицу, необходимых для ее разрушения.

В данном случае наибольший интерес представляет величина $\bar{f}$, связанная со скоростью удара шаров зависимостью

$$\bar{f} = P v^*, \quad (14)$$

где P – вероятность попадания частицы в рабочую зону, v^* – частота соударения шара с соседними шарами.

Вероятность попадания частицы в зону контакта (P) определяется в свою очередь

$$P = \frac{V_3}{V_k (1-n)}, \quad (15)$$

где V_3 – объѐм захвата частиц; V_k – объѐм помольной камеры; n – объѐмная концентрация шаровой загрузки.

Частота соударения шаров (v^*) выразится через скорость удара v

$$v^* = v / \ell, \quad (16)$$

где ℓ – расстояние между шарами при ударе.

С учётом (16) и при условии удержания частицы в момент, можно представить зависимость (14) в следующем виде

$$\bar{f} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{f^2 \cdot d^2 \cdot \delta}{v_k \cdot (1-n)} \cdot \frac{v}{\ell}, \quad (17)$$

Следовательно, на дисперсионные свойства материала будут оказывать, как частота ударов шаров, так и их совокупность при помоле. Таким образом, предложенные вышеуказанные зависимости позволяют управлять процессом измельчения различных материалов и переносить результаты на вибрационные мельницы.

Зная для каждого материала прочностные характеристики, можно подобрать оптимальные параметры измельчителя (частоту и амплитуду колебаний, размер мелющих тел, степень загрузки), при котором мелющие тела будут измельчать материал в условиях близким к состоянию разрушения материала, обеспечив тем самым наиболее низкую энергоѐмкость процесса и отсутствие агрегации частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин, Ю. А. Теоретические основы процессов активации тонких сред при их измельчении и смешении / Ю.А. Веригин // Вибротехнология-91: Всесоюз. научн. школа по смешению материалов и сред, 22-29 сентября 1991, г. Одесса: конспекты лекций. – Одесса, 1991. – ч. 3. – С. 15-22.
2. Сартаков, А. В. Выбор амплитудно-частотных характеристик вибрационных измельчителей для обработки строительных материалов с позиции необходимого критерия работы / А. В. Сартаков // Ползуновский альманах. – 2016. – № 3. – С. 197-200.

Сартаков А.В. – к.т.н., доцент кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: sartakov_1974@mail.ru.