

Кроме этого для сравнения были выбраны активная пуццолана – пыль от производства ферросилиция – микрокремнезем, тонко молотые кварц и корунд.

Анализируя полученные данные по прочности можно сделать вывод, что лучшие прочностные свойства имеют системы с добавкой природного волластонита, ранкинита, доменного гранулированного шлака (ДГШ) и золошлаковых отходов (ЗШО), повышающие прочность на 20-27% выше контроля (рисунок 4).

Хорошо проявили себя в поздние сроки ЗШО и ВКЗ, дающие повышение прочности на 22-29%. Это можно объяснить тем, что кислые ЗШО и шлаки в процессе гидратации связывают известь гидролизующихся клинкерных силикатов.

Полученные данные подтверждают гипотезу об определяющей роли кристаллохимического строения кремне-кислородного аниона добавок: содержание в структуре добавок диортогруппы $[\text{Si}_2\text{O}_7]$ или фрагментов диортогруппы, а также волластонитовых цепочек, лент и слоев, в которых можно выде-

лить $[\text{Si}_2\text{O}_7]$ или пентомеры являются наиболее эффективными добавками, работающими по схеме шаблонирования (репликации, сборки) структуры геля C-S-H.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Richardson, I. G. The calcium silicate hydrates / I. G. Richardson // Cement and Concrete Research. 2008. – № 38. – С. 137–158.
2. Егоров-Тисменко, Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия / Ю. К. Егоров-Тисменко. – М.: Изд-во книжный дом «Университет», 2005. – 589 с.
3. Бердов, Г. И. Влияние волластонита на прочность цементного камня из длительного хранения портландцемента / Г. И. Бердов, Л. В. Ильина // Строительные материалы. – 2011. – № 1. – С. 48-49.

Садрашева А.О. – аспирант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: aizhanaolegovna@mail.ru.

Песоцкий А.В. – аспирант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

УДК 621.926:519.6

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ВИБРОИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

А. В. Сартakov

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

Рассмотрены движения внутримельничной загрузки в виброизмельчителях, установлены закономерности движения, на основе чего предложена методика обоснования параметров режимов работы вибрационных измельчителей.

Ключевые слова: *измельчение, виброизмельчители, внутримельничная загрузка, дисперсность, агрегация.*

Измельчение материалов является одной из завершающих технологических операций при переработки исходного сырья в промышленных отраслях, в частности в строительстве. Процесс осуществляется в измельчителях различного типа. Это аппараты ударного действия (дезинтеграторы, струйные мельницы), истирающего действия (валковые, роликовые мельницы), ударно-истирающего действия (шаровые, вибрационные, планетарные мельницы) и др. Основным недостатком, присущим для всех перечисленных измельчителей, являются низкий к.п.д., высокая энергоемкость процесса и

весьма ограниченная кинетика измельчения, обусловленная агрегацией мелких частиц, снижающей удельную поверхность продукта.

Пути решения отмеченных проблем возможны совершенствованием продукции измельчительных аппаратов и экспериментальным определением наиболее эффективных режимов работы оборудования. К сожалению, это не всегда удается, так как подобное оборудование выпускается серийно и сложно вмешаться в корректировку процесса работы аппарата. Известно также, что эффективность измельчительного процесса заключается в организации сложных форм траекто-

рии движения рабочих органов путем сочетания их возвратно-поступательных и вращательных движений в объеме измельчительно-го аппарата [1]. В связи с этим в последние десятилетия ведутся интенсивные разработки по усложнению пространственной кинематики движения мелющих тел и загрузки в измельчителях, что обеспечивает создание условий повышения энергонапряженности в зоне контакта измельчающего тела с отдельными микромассами перерабатываемого материала. Это, в свою очередь, требует корректировки существующих теоретических положений по расчету, выбору и проектированию эксплуатационных параметров аппаратов. Задачи подобного типа решались с помощью эмпирических зависимостей из-за сложности процесса, зависящего от многих переменных факторов и явлений, происходящих в ходе рабочего процесса измельчителя.

Первые теоретические математические модели измельчения были предложены П. Риттингером (1867), Кирпичевым-Киком (1885) и модифицированы Ф. Бондом, П. Ребиндером, А. Рундквистом и другими учеными. Предложенные зависимости были приемлемой для определенной крупности измельчаемого продукта и носили полуэмпирический характер, так как не учитывали влияние таких параметров как внутренняя структура вещества, его химическую активность, термодинамическое состояние и многое другое. В исследованиях А. Гриффитса, Г. Баренблатта, Г. Румпфа и других были представлены закономерности измельчения материалов с позиции его микроструктурных свойств. Эти разработки позволили более точно определить напряжения и энергию, необходимые для начала дефектности в материалах, однако не дали полной оценки всех химических и физических изменений, происходящих в микрообъемах измельчаемой среды. В работах В.И. Баловнева определяется энергия измельчения в зависимости от природы сил, действующих на материал и вероятности их появления в разрушаемом материале [2]. Профессором Ю.А. Веригиным с позиции термодинамического анализа представлена зависимость работы измельчения, учитывающая целый комплекс явлений, таких как температурные напряжения, изменение деформационного состояния вещества, химическую активность и молекулярно-кинетические аспекты [3]. Следует отметить, что все вышеотмеченные модели отражают условия непрерывного роста дисперсности в

измельчаемой среде. Этого на практике не наблюдается, так как при тонком измельчении среды вступает в силу обратный процесс, связанный с образованием наклепа частиц (агрегатов), в результате чего дисперсность материала понижается.

Явление агрегации материала – фактор малоизученный, однако, его нельзя не учитывать при расчете режимов измельчительного оборудования. Следовательно, режим измельчения необходимо осуществлять с учетом неизбежного агрегирования частиц. Анализируя современные представления теории и практики измельчения, можно отметить, что измельчительный аппарат должен обладать:

- 1) большим числом воздействия на обрабатываемый продукт, что заключается в организации сложной траектории движения его рабочих органов;

- 2) низкой энергоемкостью и высокой энергонапряженностью процесса;

- 3) автоматической настройкой рабочих режимов в зависимости от структурно-механических свойств измельчаемого материала и его склонности к агрегированию.

Перечисленным требованиям удовлетворительно отвечают вибрационные измельчители, обладающие высокой энергонапряженностью, более низкой (по сравнению с шаровыми) энергоемкостью и возможностями регулировки рабочих режимов. Многочисленные экспериментальные исследования режимов вибрационного измельчения установили, что с увеличением энергонапряженности увеличивается энергоемкость процесса и износ конструкции мельниц [4], следовательно, параметры виброизмельчения должны оптимально сочетаться со свойствами обрабатываемого материала. В связи с этим возникает задача расчета скоростных режимов движения внутримельничной загрузки в вибрационных мельницах. Несмотря на существующий опыт вибрационного измельчения, до сих пор нет оценки и методики расчета для подбора рационального режима измельчения с эффективными эксплуатационными показателями измельчения. Обозначенная проблема решается совершенствованием механики процесса измельчения. Для этого было рассмотрено движение внутримельничной загрузки и установлены его общие закономерности.

Создание закономерностей, описывающих характер движения внутримельничной загрузки, основывается на представлении ударно-импульсного механизма воздействия мелющих тел друг с другом. Решая совмест-

но уравнения скорости вибраций и импульса движения загрузки, была получена система уравнений скорости движения слоя мелющих тел при ударе о вибрирующую плоскость

$$\left\{ \begin{aligned} v_x &= \frac{m_1(1+f)(-A_x \cdot \omega \sin(\omega t - \varphi_x))}{m_1 + m_2} + \\ &+ \frac{(m_2 - fm_1)u_x}{m_1 + m_2}; \\ v_y &= \frac{m_1(1+R)(A_y \cdot \omega \cos(\omega t - \varphi_y))}{m_1 + m_2} + \\ &+ \frac{(m_2 - Rm_1)u_y}{m_1 + m_2}; \\ w' &= \frac{I_1(1+f)(-\frac{A_x}{\rho_{ш}} \sin(\omega t - \varphi_x))}{m_1 + m_2} + \\ &+ \frac{(I_2 - fI_1) \frac{u_x}{\rho_{ш}}}{m_1 + m_2}, \end{aligned} \right.$$

где u_x, u_y – доударные скорости при поступательном движении слоя мелющих тел; v_x, v_y, w' – послеударные скорости при поступательном и вращательном движениях; m_1, I_1, m_2, I_2 – массы, моменты инерции, вибрирующей плоскости и слоя мелющих тел; $A_x, A_y, \omega, \varphi_x, \varphi_y$ – амплитуда, частота, начальная фаза колебаний, виброисточника; R, f – коэффициент восстановления удара, коэффициент трения; $\rho_{ш}$ – радиус слоя шаровой загрузки.

Предполагая, что слой мелющих тел (шаров), получивших энергию, является её новым источником для аналогичного неподвижного слоя тела, можно выделить следующее условие

$$V_j = U_j,$$

где V_j – конечная скорость слоя шаров при предыдущем ударе от виброкорпуса; U_j – начальная скорость слоя шаров при текущем ударе, переданная последующему неподвижному слою.

Таким образом, энергия вибрации будет последовательно переходить от слоя к слою. Такой подход позволяет рассчитать скорость движения рабочих тела в любой точке корпуса вибромельницы. Это позволило установить взаимосвязь показателей работы виброизмельчителя (расход энергии, производительность, тонина помола материала) с его

основными параметрами (частота и амплитуда колебаний, размер мелющих тел, степень загрузки рабочей камеры). Энергия (работа), необходимая для движения внутримельничной загрузки, определяется как

$$A_{\Sigma} = 2 \pi \cdot f_0 \cdot \omega^2 \cdot [0,5 \cdot (A_R + A_0)]^2 \cdot M,$$

где A_R – амплитуда колебаний крайнего наружного слоя шаровой загрузки; A_0 – амплитуда колебаний крайнего внутреннего слоя шаровой загрузки; M – общая масса внутримельничной загрузки; f_0 – коэффициент скольжения; ω – частота колебаний.

Масса загрузки M рассчитывается следующим образом

$$M = m_{ш} + m_m,$$

где $m_{ш}$ – масса шаров; m_m – масса измельчаемого материала.

Массы через объём измельчительной камеры выразятся

$$m_{ш} = \rho_{ш} \cdot V_{ш},$$

где $\rho_{ш}$ – плотность шаров; $V_{ш}$ – объём шаровой загрузки или

$$m_{ш} = \rho_{ш} \cdot \varphi \cdot V_k,$$

где φ – степень загрузки измельчительной камеры шарами; V_k – объём измельчительной камеры.

$$m_m = \rho_m \cdot \varphi \cdot V_k / i,$$

где ρ_m – плотность измельчаемого материала; i – соотношение между объёмом мелющих шаров и измельчаемого материала.

$$i = V_{ш} / V_m,$$

где V_m – объём измельчаемого материала.

V_m в зависимости от укладки шаров можно определить следующим образом

$$V_m = \varphi \cdot V_k / i',$$

где

$$i' = \begin{cases} i, i \geq \frac{1}{1-\mu} \\ \mu \cdot i + 1, i \leq \frac{1}{1-\mu} \end{cases},$$

где μ – коэффициент укладки шаров.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ВИБРОИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Мощность, необходимая на приведение внутримельничной загрузки в рабочее состояние, определяется как работа измельчения, выполненная за один оборот корпуса вибромельницы

$$P = \frac{A_{\Sigma} \cdot n}{1000}, \text{ кВт}$$

где n – число оборотов мельницы за 1 с.

Из предыдущих исследований кинетики помола материалов были представлены зависимости изменения его дисперсных свойств, позволяющие определить характер формирования новых поверхностей при различных режимах виброизмельчения [4]

$$S = S_0 + S_m(1 - e^{-k_2 t}),$$

$$d = d_0 - d_m(1 - e^{-k_2 t}),$$

где S_0 , d_0 , S_m , d_m – начальные и предельные удельные поверхности и размеры частиц измельчаемых материалов.

K_2 – показатель экспоненты, определяемый как

$$K_2 = \frac{K_1 N}{V},$$

где N – мощность измельчения; V – общий объем измельчаемых частиц, K_1 – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала при измельчении.

В свою очередь, K_1 можно выразить

$$K_1 = \frac{K}{e + Bl \cdot S_m},$$

где K – кпд измельчения; e – плотность энергии предельных упругих деформаций, Дж/м³; B – плотность энергии предельных пластических деформаций, Дж/м³; l – глубина слоя пластических деформаций, м; S_m – удельная поверхность предельно измельченного порошка, м²/м³.

Кпд измельчения рассчитывается с использованием подхода в [5] как отношение энергии, необходимой для разрушения частиц материала к затраченной энергии следующим образом

$$K = \frac{\sigma \cdot x^2 \cdot l_m}{m_u \cdot A \cdot w^2 \cdot l_u},$$

где σ – предельное циклическое напряжение; x – расстояние между шаровыми слоями при контакте с измельчаемым материалом (принимается в диапазоне $[\delta \div 0,1d_{\text{ш}}]$, где δ – размер частиц, $d_{\text{ш}}$ – размер мелющего тела), l_m, l_u – перемещение слоев материала и шарового слоя при их взаимодействии (с учетом движения загрузки можно принять $l_m \approx l_u$); m_u – масса шарового слоя; A, ω – амплитуда, частота колебаний шарового слоя.

На основе полученных уравнений была разработана методика расчёта параметров и выбора режимов вибрационных измельчителей. Ее основные положения:

- предварительный подбор параметров измельчения с учётом необходимых усилий, затраченных на измельчение частиц материала;
- расчёт энергии и мощности измельчения;
- определение времени измельчения и производительности измельчителя;
- сравнение эксплуатационных показателей, полученных по расчётам и выбор наиболее оптимального режима настройки виброизмельчительного аппарата.

Разработанная методика позволяет совершенствовать процесс виброизмельчения путём оптимизации параметров вибрационных мельниц, что приводит к рациональному использованию энергоресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин, Ю. А. Кинематический анализ рабочих процессов аппаратов как средство создания новых устройств для измельчения и смешения материалов // Технология сыпучих материалов: Тр. всесоюзной конференции / Ярославль, 1989. – Т.2. – С. 147-148.
2. Баловнев, В. И. Определение сопротивлений и энергии при измельчении материала / В. И. Баловнев // Строительные и дорожные машины. – 1988. – № 1. – С. 24-25.
3. Веригин, Ю. А. Теоретические основы процессов активации тонких сред при их измельчении и смешении / Ю. А. Веригин // «Вибротехнология-91»: Всесоюзная Научная школа по смешению материалов и сред. – 22-29 сентября 1991, Одесса. – Ч. 3. – С. 15-22.
4. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.

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.