

РАЗРАБОТКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ю.А. Веригин, Л.Ю. Маликова, Я.Ю. Веригина

В работе анализируется процесс измельчения вещества до тонкодисперсного состояния. Определяются условия оптимизации процесса помола микрочастиц в шаровых мельницах. Приводятся сравнительные результаты измельчения кварцевого песка в различных аппаратах.

Описывается математическая модель процесса измельчения со встроенным энергообменным устройством и предложены условия оптимизации её рабочих параметров.

Ключевые слова: измельчение, разрушение, дисперсии, структура, дефектность, энергообменное устройство, энергобаланс, скорость.

Для измельчения материалов (цементные клинкеры, гипс, карбиды кремния и др.) используются шаровые мельницы, в том числе вибрационные, планетарные и др. Процесс измельчения осуществляется при постоянных режимах работы (число оборотов рабочего органа, частота и амплитуда колебаний системы), что не позволяет оптимизировать режимные параметры измельчительного агрегата.

Опыт показывает, что с уменьшением размеров микрочастицы меняется дефектность ее структуры. Она как бы упрочняется, освобождаясь от первичной дефектности, что требует изменения режимных параметров измельчительного агрегата (рисунок 1) в [1], то есть переход через точку бифуркации 1 требует изменения параметров порядка. С уменьшением размеров микрочастицы происходит уменьшение ее объемной структурной дефектности и разрушение идет в основном по кристаллическим плоскостям кластерной структуры вещества. При этом, в зависимости от ее деформационных свойств, разрушение может быть вязким либо хрупким с различной природой зарождения дефектов (рисунок 1).

Для каждого вида разрушения характерен индивидуальный сценарий зарождения микротрещин и роста макродефектов:

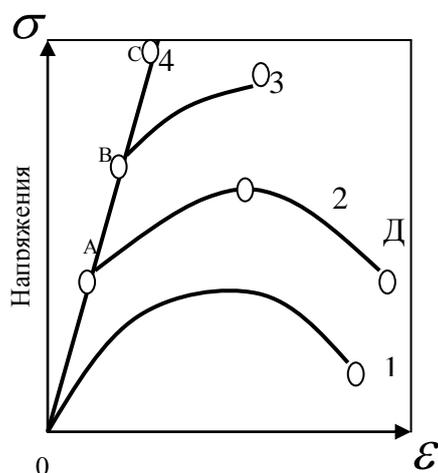
- хрупкое разрушение сопровождается интенсивным ветвлением микротрещин и сопровождается со скоростью близкой к $v_{тр}$, равному 1800-2000 м/с;

- вязкое разрушение обеспечивает расширение устья трещины с последующим ростом соизмеримым со скоростью

$$v_{тр} = 0,3 - 0,8v_{зв},$$

где $v_{зв}$ – скорость звука.

Поверхность вновь образованных зерен (фрактограмма) также разнообразна. Для хрупкого монокристаллического разрушения, являющегося следствием разрыва межатомных связей по кристаллографическим плоскостям, характерны гладкие поверхности, отражающие световое излучение. Поэтому поверхность излома блестящая, а наличие ступенек излома позволяет рассчитать поверхностную энергию ультрадисперсной частицы σ_a .



1 – низкопрочный пластический материал; 2 – упругопластический материал; 3 – высокопрочный пластический материал; 4 – хрупкий материал, ОАВС – участок упругой деформации; АД – пластическая деформация

Рисунок 1 – Характер диаграммы напряжений – деформаций в микрообъеме вещества

Поликристаллическое разрушение происходит по границе раздела зерен, и поэтому рост трещины скола ограничивается плоскостями зерновой ориентации и имеет ступенчатый характер. Ступеньки являются признаком «перескока» трещины с одной плоскости на другую. Разрушение вязких тел сопровождается деформацией материала и накоплением его дефектности. Поверхность раздела матовая и рассеивает световое излучение.

Описанная картина разрушения микрообъемов материала показывает, что в зависимости от природы измельчаемого продукта следует подбирать тип измельчителя и его режимные параметры работы.

Процесс разрушения кластерных ансамблей микрочастицы (рисунок 1) сопровождается потреблением энергии измельчения, которая расходуется на:

- создание поля напряжений, релаксирующихся в локальных микрогетерогенных областях микрочастицы;
- обеспечение пластической деформации кристаллической структуры кластерного блока и его зерен, перемещения точечных дефектов, концентрации дислокаций, размножения и роста трещин с последующим увеличением удельной поверхности вещества \mathfrak{S} и степени его измельчения i ;
- рассеивание энергии в виде тепловых деформаций и пассивного тепла.

Полученный продукт отличается от исходного более высокой удельной поверхностью, повышенной химической и реакционной способностью и высокой структурной прочностью дисперсной фазы. Это дает основание для вывода, что механически разрушенная ультрадисперсная система ведет себя как новое вещество, отличное от исходного продукта.

Длительность процесса разрушения зависит от частоты (скорости) импульсных воздействий измельчительного аппарата.

Эффект разрушения повышается при совпадении дебаевской частоты колебаний кристаллической структуры кластерного блока со скоростью релаксации напряжений.

Для обеспечения этого условия необходимо обеспечить частоту или скорость импульсных воздействий измельчителя, которая может определиться из условия [1]

$$A_p = NRT \ln \left[\frac{18RT}{ah} K_m \rho^* l^6 (i-1) \right]. \quad (1)$$

Приняв во внимание, что скорость разрушения $v_{уд}$ эквивалентна 1/3 скорости распространения упругих деформаций (a) в кристаллической решетке блока и решая полученную зависимость относительно v_p можно определить оптимальную скорость механического воздействия (удара) измельчительного органа на ультрадисперсную среду (единичную дисперсную частицу).

$$v_{уд} = \frac{K_m \rho^* \mathfrak{S} T l i}{0,42 N_T \frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где K_m – молярная концентрация вещества; ρ^* – удельная плотность дислокаций на единицу поверхности; T – абсолютная температура среды; \mathfrak{S} – удельная поверхность вещества; l – средний размер микрочастицы; i – степень измельчения; t – длительность процесса; N_T – теоретически потребная энергия для разрушения частицы по Гриффитсу; действительная работа разрушения вещества; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана.

В уравнении (2) произведение

$$\rho^* \cdot \mathfrak{S} = K_\alpha$$

показывает уровень дефектности структуры вещества. Так, например, для кварцевого песка активированного в шаровой мельнице с энергообменным устройством (таблица 1)

$$K_\alpha = 4 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^6 = 12 \cdot 10^{11}.$$

Анализ результатов табличных данных и уравнения (2) указывают на то, что скорость разрушения, а, следовательно, и режим работы измельчителей, зависят от требуемой активности вещества. Поэтому режимные параметры измельчителей должны иметь устройства для настройки скоростных режимов в процессе рабочего цикла, что исключит процесс агрегации мелких фракций, тем самым обеспечит непрерывность процесса и существенно сократит энергоемкость процесса измельчения.

Для этих целей разработана универсальная шаровая мельница с энергообменными устройствами, обеспечивающими изменение режимных параметров процесса в ходе ее работы [2], т.е. без остановки аппарата.

РАЗРАБОТКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ
МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Таблица 1 Результаты ультрадисперсного измельчения кварцевого песка различными способами

Способ активации	Время активации, с	Удельная поверхность, ζ БЭТ, м ² /г	Размеры микроблоков первичных кристаллов, D, нм	Значения относительных среднеквадратичных микродеформаций решетки $\sqrt{\varepsilon^{-2}}$, 10 ⁻³	Усредненная плотность дислокаций, ρ^* , 1/м ²
Исходные характеристики порошка	-	0,02	192	нет	нет
Шаровая мельница	1800	0,11	161	-	-
	3600	2,30	120	-	-
	5400	4,19	106	-	-
	9000	4,17	108	-	-
Вибрационная мельница	300	0,50	103	-	-
	600	2,17	78	-	-
	2100	6,05	63	2,9	-
	5400	7,12	59	2,8	-
	7200	7,01	59	2,8	-
Планетарная мельница	160	2,39	68	2,7	-
	600	6,18	46	2,9	-
	1200	12,03	24	5,1	3·10 ⁶
	1800	11,69	20	5,3	3·10 ⁶
Шаровая мельница с козырьковым энергообменником	180	4,12	56	3,8	-
	600	9,06	42	4,3	4·10 ⁵
	1200	14,78	23	5,7	3·10 ⁶
	1800	16,21	18	7,0	6·10 ⁷

Предлагаемая конструкция быстроходной шаровой мельницы (БШМ) всесторонне исследована и позволяет интенсифицировать процесс измельчения путем усложнения траектории движения и скорости движения мелющих тел с использованием их кинетической (разгонной) энергии для воздействия на материал [3].

Усложнение траектории движения загрузки в БШМ осуществляется за счет установки внутри барабана мельницы в зоне максимального подъема мелющих тел неподвижного энергообменного устройства, выполненного в виде сферической криволинейной поверхности с клиновым выступом, и приданию внутренней поверхности барабана сферической формы.

Отличительной особенностью данной конструкции мельницы является то, что она позволяет интенсифицировать процесс измельчения за счет увеличения частоты вращения барабана за критическое число оборотов.

Данная мельница эффективно работает и в так называемом режиме «махового колеса», когда скорость вращения барабана значительно выше критической, а набранная кинетическая энергия падающего мелющего

тела используется для интенсификации удара, создавая тем самым требуемую энергонапряженность.

В отличие от других технических решений БШМ с энергообменным устройством является малогабаритной, хотя и более конструктивно сложной в изготовлении в сравнении с обычными шаровыми мельницами, зато обеспечивает измельчение материалов до любой (требуемой) дисперсности.

Для исследования динамики мелющих тел в данной мельнице предлагается математическая модель, устанавливающая взаимосвязь следующих параметров: скорости удара мелющего тела ($v_{уд}$), внешнего радиуса барабана мельницы (R), длины барабана (L), радиуса кривизны внутренней поверхности барабана (R1), частоты вращения барабана (n), криволинейности поверхности энергообменного устройства (p) и угла его наклона (α). В качестве мелющего тела используется шар, рассматриваемый как материальная точка.

Математическая модель представляет собой совокупность математического описания и алгоритма решения уравнений, доведенной до конкретной программной реализации на ЭВМ.

Разработанная математическая модель включает следующие основные уравнения:

- уравнение, описывающее внутреннюю поверхность барабана мельницы (уравнение круговой бочки)

$$\psi(x, y, z) = (\sqrt{x^2 + y^2} + R_1 - R)^2 + z^2 = R_1^2; \quad (3)$$

$$z \in [-L/2, L/2]$$

- уравнение, описывающее поверхность энерго-обменного устройства поверхность образована движением параболы относительно дуги окружности радиуса (R1)

$$\Phi(x, y, z) = (x \cdot \sin \alpha + y \cdot \cos \alpha)^2 - 2 \cdot p \cdot (\cos \alpha \cdot x - \sin \alpha \cdot y + R - R_1 + \sqrt{R_1^2 - z^2}) = 0. \quad (4)$$

$$z \in [-L/2, L/2], \quad 0 < p < R/2.$$

Так как поверхность энергообменного устройства имеет клинообразный выступ, то в уравнение поверхности вводится следующее ограничение

$$-\sqrt{R^2 / (1 + \tan^2 \alpha)} \leq x \leq R/2 - R \cdot |z|/L; \quad (5)$$

- систему дифференциальных уравнений движения мелющего тела относительно поверхности энерго-обменного устройства

$$\begin{cases} m \ddot{x} = \frac{N}{\Delta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + f_{mp} \cdot \frac{N}{\Delta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \\ m \ddot{y} = \frac{N}{\Delta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + f_{mp} \cdot \frac{N}{\Delta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - mg \\ m \ddot{z} = \frac{N}{\Delta} \frac{\partial \Phi}{\partial z} + f_{mp} \cdot \frac{N}{\Delta} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \end{cases}, \quad (6)$$

где

$$\Delta = \pm \sqrt{(\partial \Phi / \partial x)^2 + (\partial \Phi / \partial y)^2 + (\partial \Phi / \partial z)^2};$$

N – нормальная реакция поверхности; m – масса мелющего тела; $f_{тр}$ – коэффициент трения; g – ускорение свободного падения.

Относительно поверхности, заданной уравнениями (4) и (5), мелющее тело движется по инерции и может сойти с поверхности, либо когда N = 0, либо когда поверхность закончится.

Решая систему уравнений (6) одним из численных методов, например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка, можно найти скорость движения мелющего тела (v_1) и координаты

точки (например, т. O₁ (x₁, y₁, z₁), рисунок 2), в которой мелющее тело сойдет с поверхности и будет свободно падать под действием силы тяжести и приобретенной кинетической энергии.

Начальные условия для решения системы (6) могут быть следующими

$$x_0 = -R \cdot \cos(\alpha), \quad y_0 = R \cdot \sin(\alpha),$$

$$z_0 = 0, \quad v_{ox} = v_0 \cdot \cos(\alpha),$$

$$v_{oy} = v_0 \cdot \sin(\alpha), \quad v_{oz} = 0,$$

$$v_0 = \omega \cdot R = \pi \cdot n \cdot R/30, \quad n > n_{кр};$$

- уравнения свободного падения мелющего тела

$$\begin{cases} m \ddot{x} = 0 \\ m \ddot{y} = -mg \\ m \ddot{z} = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

Решая эту систему уравнений стандартным интегрированием со следующими начальными условиями

$$\dot{x} = x_1; \quad \dot{y} = y_1; \quad \dot{z} = z_1; \quad \dot{x} = v_{1x}; \quad \dot{y} = v_{1y}; \quad \dot{z} = v_{1z}$$

можно определить скорость удара мелющего тела о внутреннюю поверхность вращающегося барабана мельницы (скорость в т. O₂, рисунок 3)

$$v_{уд1} = \sqrt{v_{1x}^2 + (v_{1y} - mg \cdot T)^2 + v_{1z}^2}, \quad (8)$$

где T – время, когда происходит соприкосновение шара с барабаном мельницы.

Время T определяется из следующего уравнения

$$\begin{aligned} & (\sqrt{(V_{0x} \cdot T + x_0)^2} + \\ & + \left(-\frac{mg \cdot T^2}{2} + V_{0y} \cdot T + y_0 \right)^2 + \\ & + R_1 - R)^2 + (V_{0z} \cdot T + z_0)^2 = R_1^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Это уравнение решается одним из численных методов, например, методом дихотомии.

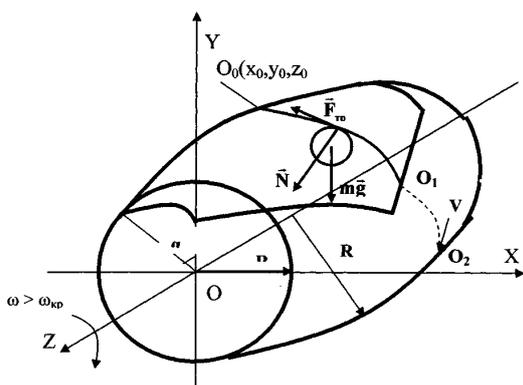


Рисунок 2 – Схема движения мелющего тела внутри БШМ с энергообменным устройством

Удар шара о поверхность вращающегося барабана мельницы может быть представлен как удар о движущуюся плоскость, являющуюся касательной к поверхности барабана в точке касания с шаром. Скорость движения плоскости параллельна этой плоскости.

При рассмотрении косоугольного центрального упругого удара ось n проходит вдоль линии центров соударяемых тел, ось t перпендикулярна оси n (рисунок 3).

Проекции скорости шара в начале удара на нормаль и касательную имеют вид

$$v_{1n} = v_{ydl} \cdot \cos \varphi; v_{1t} = v_{ydl} \cdot \sin \varphi, \quad (10)$$

где v_{ydl} – доударная скорость в точке O_2 (рисунок 2); φ – угол падения шара на внутреннюю поверхность барабана мельницы.

Угол падения шара (φ) на поверхность ψ (x, y, z), заданную уравнением (8) определяется следующим образом

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot v_{1x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot v_{1y} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \cdot v_{1z}}{\text{grad} \cdot v_{ydl}} \right). \quad (11)$$

Проекции скорости шара в конце удара на нормаль и касательную имеют вид

$$\begin{aligned} u_{1t} &= (1 - \lambda) \cdot v_{1t}, \\ u_{1n} &= u + \rho \cdot (u - v_{1n}), \\ u &= \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2} \end{aligned} \quad (12)$$

где ρ – коэффициент восстановления, характеризующий, насколько восстанавливается

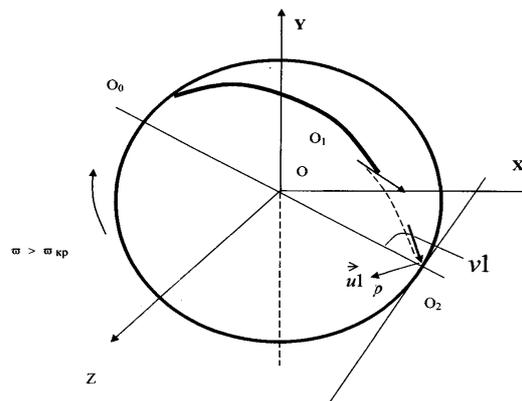


Рисунок 3 – К расчету центрального упругого удара мелющего тела

скорость после удара и зависящий от материала соударяемых тел; λ – коэффициент мгновенного трения; m_1, m_2 – массы соударяемых тел.

Разрушение частиц материала происходит в том случае, когда они оказываются в зоне контакта между мелющими телами и футировкой мельницы.

При столкновении шаров со стенкой барабана мельницы энергия взаимодействия запишется следующим образом

$$E_i = E_{in} + E_{it}, \quad (13)$$

где E_i – изменение кинетической энергии i -го шара при ударе о корпус мельницы; E_{in} – часть кинетической энергии, расходуемая на удар (раздавливание) материала; E_{it} – часть кинетической энергии, расходуемая на истирание материала.

В конечном итоге энергию измельчения можно рассчитать через скорость движения мелющих тел (например, шаров)

$$\begin{cases} E_{in} = \frac{m_i}{2} (v_{in}^2 - u_{in}^2) \\ E_{it} = \frac{m_i}{2} (v_{it}^2 - u_{it}^2) \end{cases}, \quad (14)$$

где m_i – масса шара; v_i, u_i – скорости, определяемые в уравнениях (10) и (11).

Энергобаланс соударений одного мелющего тела, показанный в системе (12), описывает только единичный акт его взаимодействия на материал. Во многих случаях для оценки эффективности работы помольного оборудования важно знать полную нагрузку на привод мельницы, что позволяет

определить необходимую возможность, развиваемую приводом.

В последние годы в технической литературе все чаще обращается внимание на факт образования в центре внутримельничной загрузки так называемого малоподвижного ядра, однако роль его в механике барабанных мельниц до сих пор не определена. Существует мнение, что зона ядра не играет никакой роли при формировании элюры внутримельничного заполнения, т.е. является непроизводительной, мертвой («застойной») зоной, поэтому предлагаются новые конструктивные решения мельниц, которые за счет усложнения движения внутримельничной загрузки обеспечивают разрушение застойных зон мелющей загрузки и включение в работу дополнительно до 40-50% мелющих тел, а также снижение (на 10-15%) массы мелющей загрузки.

С другой стороны, в некоторых работах отмечается, что зона ядра оказывает активное истирающее воздействие на измельчаемый материал, и там же приводятся теоретические закономерности механики движения материала в барабанных мельницах с учетом влияния малоподвижного ядра.

В БШМ со сферической внутренней поверхностью и энергообменным устройством (рисунок 2) загрузка совершает движение в продольном и поперечном направлениях, поэтому происходит разрушение «застойной зоны» и механику движения мелющих тел и материала можно рассматривать без малоподвижного ядра.

Мощность, необходимая для движения внутримельничной загрузки, определяется как

$$N = \frac{(A_1 + A_2) \cdot \zeta \cdot n}{60 \cdot \eta}, \quad (15)$$

где n – число оборотов барабана мельницы, об/мин; η – КПД привода мельницы; ζ – число циклов движения загрузки за один оборот барабана мельницы, определяемое по следующей формуле

$$\zeta = 1/n \cdot (T_1 + T_2 + T_3), \quad (16)$$

где T_1 – условное время движения по круговой траектории; T_2 – условное время движения относительно поверхности энергообменного устройства; T_3 – время движения по траектории свободного падения (параболической);

A_1 – работа, необходимая для подъема загрузки на определенную высоту, начиная с которой они двигаются относительно поверхности энергообменного устройства

$$A_1 = G \cdot H, \quad (17)$$

где G – сила тяжести загрузки; H – высота подъема загрузки;

A_2 – работа, необходимая для сообщения шарам кинетической энергии

$$A_2 = M \cdot v_0^2 / 2, \quad (18)$$

где M – масса мелющих тел; v_0 – скорость движения по круговой траектории.

Предлагаемая математическая модель позволяет управлять процессом измельчения различных материалов и переносить результаты на шаровые мельницы любых конструкций.

Зная для каждого материала скорость его разрушения, можно подобрать оптимальные параметры мельницы (скорость вращения барабана, кривизну внутренней поверхности барабана и энергообменного устройства), при которых мелющие тела будут измельчать материал со скоростью удара близкой к скорости его разрушения, обеспечив тем самым наиболее низкую энергоемкость процесса отсутствия агрегации частиц и тем самым оптимизировать процесс измельчения материалов до заданной степени измельчения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин Ю.А. Теоретические основы измельчения вещества в технологии производства строительных материалов / Веригин Ю.А., Веригина Я.Ю. // Ползуновский вестник. 2013. – № 4-1. – С. 51-54.
2. Авторское свидетельство 915951. СССР, МКИ В02 с 17/10 Шаровая мельница / Ю.А. Веригин, Е.А. Дрозд, В.А. Польских; – опуб. Заяв. В Б.И. – 1991. – № 15.
3. Веригин Ю.А. Моделирование рабочих процессов шаровых мельницах / Ю.А. Веригин, Л.Ю. Маликова // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 9. – С. 12-14.

Веригин Ю.А. – д.т.н., профессор, E-mail: xvergin2005@mail.ru; **Маликова Л.Ю.** – старший преподаватель; **Веригина Я.Ю.** – старший преподаватель, y.yanina@mail.ru, Алтайский государственный технический университет.