

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.А. Веригин, Я.Ю. Веригина

В работе проводится анализ существующих законов измельчения вещества до тонкодисперсного состояния. Отмечается, что в их содержании отсутствует взаимосвязь рабочих параметров машины со свойствами измельчаемой среды. На основе совместного рассмотрения молекулярно-кинетических аспектов разрушения вещества и силовых характеристик измельчительного аппарата методами неравновесной термодинамики предложена математическая модель процесса помола вещества в механических измельчителях, позволяющая оптимизировать процесс помола материалов на любой стадии измельчения.

Ключевые слова: измельчение, измельчённые материалы, нарушение структуры, энергия процессов и их параметры, оптимизация.

Задачей математического описания процесса является установление параметрической взаимосвязи дисперсности измельчаемого материала с энергозатратами мельницы и параметрами её работы.

Измельчение (помол) дисперсий в технологическом переделе материалов представляет собой сложный, наследственно-необратимый процесс и его кинетика определяется одновременным сочетанием следующих факторов:

- пластическое и упругое деформирование дисперсий;
- поверхностное взаимодействие (наклёп) частиц между собой;
- изменение дефектности микроструктуры отдельностей с последующим повышением их прочности вследствие уменьшения размеров кластерных блоков частицы;
- диссипация тепловой энергии;
- аккумулярование энергии в структурно-обусловленной системе внутренних напряжений локальных объёмов микрочастиц среды;
- изменение энтропии сплошной и дисперсной фаз в мельничной загрузке;
- изменение свойств межфазного состояния, механоэмиссии и аморфизации в измельчаемом материале.

Перечисленные наиболее важные особенности процесса обуславливают сложность его полного математического описания, а известные из литературных данных соотношения Риттингера, Бонда, Кирпичева-Кика, Ребиндера, Гийо, Баловнева В.И. и других учёных (таблица 1) получены эмпирически, либо на одностороннем учете одного из перечисленных факторов.

Современный экспериментальный и теоретический материал накопленный исследователями различных стран показывает, что теория измельчения дисперсных частиц должна строиться на основе моделей прочности твердых тел, описывающих как внутренние молекулярно-кинетические эффекты, так и физико-химические поверхностные явления, определяющие структурные взаимодействия разрушаемых микрообъектов.

Очевидно, что эмпирические зависимости приведенные в таблице 1 не охватывают полной природы измельчения вещества, процесс помола ставится в разряд не управляемых, что приводит к низкому КПД (не более 10%) помольного оборудования.

Анализируя процесс измельчения с позиций обобщенной теории прочности Гриффитса-Орована-Ребиндера можно констатировать, что он происходит в несколько этапов наиболее важными из которых являются:

- возникновение дефектов и локализация концентраций напряжений при объемном деформировании микрочастицы вещества;
- появление зародышевых микротрещин и их развитие, приводящее к разрыву кристаллической целостности структурной решетки микрочастицы;
- рост на базе зародышевых микротрещин магистральных дефектов, ответственных за разрушение микрообъема тела.

С уменьшением размеров микрочастиц микроструктура их кластерных блоков характеризуется более совершенной кристаллической решеткой, разрушение которых возможно по кристаллографическим плоскостям имеющим краевые или винтовые дислокации [1].

Таблица 1 - Основные законы измельчения

№ п/п	Автор и дата исследования	Математическая модель закона	Взаимосвязь параметров процесса	Область применения
1	Риттингер (1867)	$A = K_1 D^2$	$A = K_1 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$	При помоле материалов
2	Кирпичев-Кик (1874)	$A = K_2 D^3$	$A = K_2 \lg \frac{D}{d}$	При крупном дроблении
3	Рибиндер (1930)	$A = K_1 D^2 + K_2 D^3$	$A = K_1 \left(\frac{i-1}{D} \right) + K_2 \lg i$	При помоле и дроблении
4	Ф. Бонд (1951)	$A = K_1 K_2 \sqrt{\Delta V \Delta \zeta}$	$A = K_3 \sqrt{\frac{i-1}{D}}$	При помоле и дроблении
5	В. Баловнев (2000)	$A_{DP} = B d \sigma^n / E$	B - экспериментальный показатель	При измельчении

Принятые обозначения:

D – средний размер исходной фракции; d – средний размер фракции готового продукта; i – степень измельчения; K_1, K_2, K_3 эмпирические коэффициенты, получаемые экспериментально; B – сопротивление измельчению; n – силовой коэффициент вероятности; σ – предел прочности материала; E – модуль деформации среды.

Под воздействием рабочего органа измельчителя в микрообъемах среды повышаются внутренние напряжения в структурных решетках микрочастиц провоцируя слияние ведущих дислокаций и образование зародышевой микротрещины. Дальнейшее размножение дефектности приводит к разрушению микрочастицы или полной аморфизации вещества.

Таким образом, чтобы разрушить вещество необходимо приложить внешнее воздействие эквивалентное величине структурной прочности его внутренних связей, которые согласно закономерностей Гиббса-Гельмгольца [2] зависят от внутренней энергии микрочастицы равной dU . С позиций теории прочности описанный сценарий можно объяснить следующим образом.

При внешнем силовом воздействии P_i в микрообъеме вещества dV наводится энергия напряжений $dV\sigma$, расшатывающая структурную решетку и провоцирующая зарождение микротрещин размером d [3].

Энергетическое состояние системы «разрушаемый объект (микрочастица) – рабочий орган измельчителя» выражается соотношением

$$-dU = dF - TdQ \quad (1)$$

В данном соотношении dU – внутренняя энергия разрушаемого микрообъема dV , dF – свободная или подведенная энергия (энергия стока, обеспечивающая разрушение вещества), TdQ – тепловая энергия, выделявшаяся

под воздействием рабочего органа или тепло, подведенное к системе.

Наведенные тепловые процессы согласно первого начала термодинамики определяются соотношением

$$TdQ = dA_{T,P} + dA_q, \quad (2)$$

где dA_q – часть тепла, превратившаяся во внутреннюю энергию, т.е. рассеявшееся тепло;

$dA_{T,P}$ – работа теплового разрушения (например, фазовые или полиморфные превращения, микродеформирование, диссоциация и т.д.)

С учетом (2), уравнение (1) можно записать, что

$$-dU = dF - dA_{T,P} - dA_q \quad (3)$$

Молекулярно-кинетические основы процессов разрушения вещества [2] позволяют получить уравнение связи скорости разрушения со свободной энергией dF , необходимой для обеспечения оптимальных условий разрушения вещества, которое в общем виде можно записать как

$$a - 3dVdF' d\rho * K_m \frac{RT}{h} e^{\frac{dF-dV\sigma}{RTN}} = 0 \quad (4)$$

где a – скорость распространения упругих деформаций в веществе эквивалентная скорости удара измельчителя;

ρ - удельная плотность дислокаций в структурной решетке вещества;

F' - удельная поверхность дисперсий вещества;

l - размер отдельных дисперсий вещества;

K_m - молярная плотность вещества;

σ - теоретическая прочность разрушаемой дисперсии вещества;

h - постоянная Планка,

R - постоянная Больцмана;

N - число Авагадро,

T - абсолютная температура процесса разрушения.

Принимая во внимание, что теоретическая прочность вещества согласно положений А. Гриффитса и Е. Орована выражается соотношением

$$\sigma = 2\sqrt{\frac{A_F \cdot E}{\pi dl}}$$

и подставляя его в соотношение (4) получено

$$dF = 2dV \sqrt{\frac{A_F E}{\pi dl}} + NRT \ln \left(\frac{3RT}{ah} K_m \rho \cdot dV dF dl \right) \quad (5)$$

В приведенном уравнении A_F представляется как удельная поверхностная энергия потребная для развития микротрещины размером dl и образования новой поверхности dF' .

При деформации микрочастицы размером l и поверхностью $6l^2$ энергия деформации по Гуку определится как $\sigma^2 l^2 / 2E$. Учитывая, что микрочастица разрушается со степенью измельчения i до размеров l_i тогда вновь образованная поверхность определится как

$$F' = 6l_i^2 i^3 - 6l^2 = 6l^2 (i-1) \quad (6)$$

В свою очередь поверхностная энергия $A_{F'}$, составит

$$A_{F'} = \frac{\sigma^2 dl^3}{12E(i-1)} \quad (7)$$

Подстановкой значения $A_{F'}$, в уравнение (5) с учетом (6) имеем (в Дж)

$$dF = 0,32\sigma_p dV \sqrt{\frac{1}{i-1}} + NRT \ln \left[\left(\frac{18RT}{ah} K_m dV dl^2 (i-1) \right) \right], \quad (8)$$

Первый член полученного уравнения определяет энергию объемной деформации микрочастиц dA_{Γ} , второй член учитывает энергию, расходуемую на обеспечение хода внутрискруктурных молекулярно-кинетических процессов в разрушаемой среде dA_K .

Работа сил внутренних температурных деформаций проявляется в результате изменения температуры среды от T_o до T_b и определяется по законам термодинамики т.е.

$$dA_{T,p} = -\sigma \beta \Delta T dV \quad (9)$$

Выделившаяся при разрушении тепловая энергия dA_q определяется как

$$dA_q = -0,239dVc\rho\Delta T, \quad (10)$$

здесь c – удельная теплоемкость среды;

ρ - плотность вещества;

β - коэффициент теплового расширения вещества.

С учетом всех отмеченных энергозатрат полная энергия, необходимая для измельчения твердого вещества, выразится общим уравнением, взаимосвязывающим параметры системы «разрушаемая среда-рабочий орган» в виде (в Дж)

$$dA_p = 0,32\sigma_p dV \sqrt{\frac{1}{i-1}} + NRT \cdot \quad (11)$$

$$\cdot \ln \left[\frac{18RT}{ah} K_m \rho dl^3 dl^2 dl (i-1) \right] - \sigma_p \beta \Delta T dl^3 - 0,239C \Delta T \rho dl^3$$

Для упрощения уравнения (10) и приведения его к ранее общепринятым законам измельчения показанным в таблице 1 примем следующие обозначения

$$K_1 = 0,32\sigma_p \sqrt{\frac{1}{i-1}}, \quad K_2 = -\beta \sigma \Delta T,$$

$$K_3 = -0,239C\rho\Delta T, \quad K_4 = NRT,$$

$$K_5 = \frac{18RT}{ah} K_m \rho (i-1).$$

В соответствии с этим, можно записать, что полная энергия, необходимая для разрушения выражается соотношением (в Дж)

$$A_p = (K_1 + K_2 + K_3) \cdot dV + K_4 \ln K_5 dV dF dl. \quad (12)$$

Физический смысл коэффициентов в данном уравнении следующий:

- K_1 - определяет величины упругого и пластического деформирования, создающие поток потенциальной энергии, необходимый для обеспечения напряжений в единице объема dV с последующим его разрушением до заданной степени измельчения i ;
- K_2 - определяет условия создания дополнительных напряжений σ и тепловых деформаций в единице объема при наличии температурных градиентов ΔT в среде плотностью ρ ;
- K_3 - учитывает количество тепловой энергии диссипирующей в единице объема вещества в процессе измельчения;
- K_4 - молекулярно-кинетический оператор активизирующий аккумуляцию напряжений и механоэмиссии в структурно-обусловленной системе нанокластеров разрушаемой частицы;
- K_5 - характеризует условие, обеспечивающее экстремальный ход процесса разрушения межатомных связей, спонтанного роста микротрещин и достижения заданной степени измельчения i в единичных объемах dV_i .

Анализ уравнения (12) и его сравнение с существующими законами измельчения (таблица 1) показывает, что оно учитывает все стороны явлений, происходящие при тонком и сверхтонком измельчении материалов механическими способами и является серьезным дополнением к существующим.

Содержание в уравнении таких параметров как физико-механические свойства среды (σ , E , ρ), характеристики дисперсности материала до и после измельчения (V , l , F , i) позволяет установить взаимосвязь полезной энергии измельчения с эксплуатационными параметрами и режимами работы измельчительного оборудования.

Для обеспечения экстремальных условий течения процесса измельчения необходимо, чтобы измельчающий аппарат постоянно перестраивался на условия и режимы работы, способствующие разрушению микрообъемов с минимальными энергозатратами.

Так, например, сверхтонкое измельчение карбида кремния (SiC) в технологическом переделе при производстве композиционных материалов показывает, что кривые кинетики измельчения имеют следующий характер (рисунок 1).

Эксперименты проводились в различных мельницах (шаровой, вибрационной, планетарной). Однако кривые кинетики помола идентичны. Имеются отклонения начала бифуркации и положений точек 2 и 3.

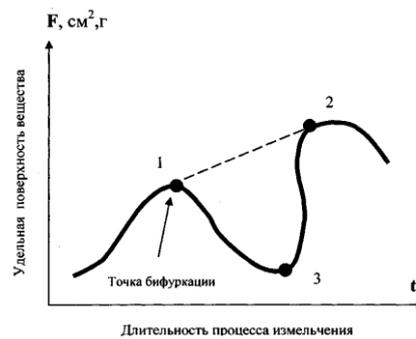


Рисунок 1 - Кинетика измельчения тонкодисперсной среды в механических измельчителях

Снижение удельной поверхности измельчаемой среды объясняется необходимостью изменения режимных параметров работы аппарата, ответственных за энергию удара при измельчении тонкой структуры вещества, которое в момент перехода от точки 1 к точке 2 подвержено «наклепу» и укрупнению отдельных зерен частиц. В результате этого имеет место падение удельной поверхности, т.е. «отказ» к измельчению (точка 3). Дальнейшее накопление внутренней энергии в новообразованиях активизирует молекулярно-кинетические эффекты и процесс измельчения вновь развивается (точка 2). Своевременное изменение режимов работы измельчителей в точке 1 позволяет исключить образование наклепа и развивать

кинетику помола по штрихпунктирной кривой. Аналогичная ситуация наблюдается и при измельчении строительных материалов таких как цемент, гипс, известь, различные красители и т.д. В особых случаях для повышения эффекта разрушения следует использовать температурные факторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М.: Металлургия. 1971. – 263 с.
2. Томсон Р.М., Зейц Ф. Строение твердых тел. – В кн.: Разрушение/ Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир. 1973. – т.1. - С. 512-538.
3. Веригин Ю.А., Толстенов С.В. Синергетические основы процессов и технологий. – Барнаул: АлтГТУ, 2007 – 172 с.

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