УДК 622.73

В.Н. БОВЕНКО, докт. техн. наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Л.Ж. ГОРОБЕЦ, докт. техн. наук, Национальный горный университет,
Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, Институт технической механики НАН и НКА Украины, г. Днепропетровск

О ФИЗИЧЕСКИХ КРИТЕРИЯХ РАЗРУШЕНИЯ И ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Наведено результати експериментально-теоретичних досліджень зв'язку дискретно-хвильового критерію микроруйнації з процесом диспергування. Обгрунтовано можливість використання цього критерію при виборі енергетично оптимальних режимів диспергування твердих матеріалів.

The results of experimental and theoretical investigation upon microdestruction discrete-wave criterion connection with dispersion process are given. The possibility to choose of energy-wise optimal conditions with use this criterion is basing for solid materials pounding.

Проблема обоснованного выбора параметров нагружения материалов в процессе их тонкого измельчения является актуальной, поскольку режим нагружения (скорость динамической деформации, температура среды, плотность энергии при разрушении, длительность нагружения) должен изменяться в зависимости от размера измельчаемых частиц. Задавая режим нагружения, можно изменить затраты на измельчение, поверхностную энергию и технологические свойства измельченного материала.

В процессах тонкого и сверхтонкого измельчения (диспергирования) особенно важно предусмотреть оптимальное использование энергии разрушения, накопленной частицами твердого материала на стадии нагружения. В данной работе для решения поставленной задачи предлагается использование связи дискретно-волнового критерия микроразрушения с процессом диспергирования.

Диспергирование является завершающим актом разрушения, и в его эффектах проявляются все детали механизма разрушения, включая образование и развитие трещин. По современным представлениям диспергирование - это процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные отдельности в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по

достижении *критического (предельного)* состояния вещества на неустойчивой авторезонансной стадии *предразрушения* под действием акустических волн [1 – 3], возникающих при автоколебательном движении атомов в этих зонах. При этом критическое состояние вещества рассматривается подобным резонансно-волновому состоянию, в котором диффузия акустического излучения оказывает разрушительное действие на кристаллическую структуру нагруженного тела.

В критическом состоянии достигается максимальный уровень накачки тела энергией, при котором формируются и растут микротрещины, образуются тонкодисперсные фрагменты и отдельности, то есть происходит интенсивное микродиспергирование. Это приводит к максимально возможной эффективности диспергирования [3, 4]. Элементарными актами микродиспергирования являются необратимые разрывы межатомных связей, происходящие на различных иерархических структурных уровнях деформации твердого тела.

Авторезонансная модель механизма диспергирования разработана с позиций *релаксационных (разрывных) колебаний* атомов вблизи дефектов структуры [1 – 6]. Колебания называют разрывными, если в определенные моменты времени изменения параметров состояния вещества происходят скачкообразно, тогда как сами системы, в которых возникают такие колебания, называют *системами разрывного типа* [7]. Такого рода системы являются открытыми системами, обменивающимися энергией и веществом с другими системами и окружающей средой. Естественно, что в процессе диспергирования очень важную роль играет скорость обмена энергией.

Согласно модели деформируемого твердого тела по В. Бовенко предразру-шающее состояние включает три стадии: *стационарную* – квазипериодические релаксационные (разрывные) колебания, *ускоренную* – стохастические автоколебания и третью неустойчивую – *авторезонансные* колебания.

Причем, соотношения между длительностями стадий выглядят как $\boldsymbol{t}_1 : \boldsymbol{t}_{11} : \boldsymbol{t}_{111} = 1 : 10^{-3} : (10^{-12} – 10^{-6})$, то есть продолжительность $\boldsymbol{t}_1$ *стационарной* стадии, характеризующей ресурс долговечности материала при статических испытаниях, примерно на три порядка превышает общую продолжительность двух других стадий ($\boldsymbol{t}_{11}$ и $\boldsymbol{t}_{111}$) [1, 8, 9]. Указанные стадии протекают неоднократно и каждый раз все физико-механические свойства контролируются дискретно-волновым критерием микроразрушения $\boldsymbol{B}_a$.

Теоретические оценки показали, что значение $\boldsymbol{B}_a$ для большинства твердых тел находится в сравнительно узком интервале от 2,1 до 3,1, так что его среднее значение равно $\boldsymbol{B}_a$] 2,6 [10]. Если $\boldsymbol{B}_a$ [2,1…3,1, нагруженное тело находится в устойчивом состоянии, а при $\boldsymbol{B}_a$ á 2,1…3,1 релаксационные автоколебания атомов приводят нагруженную систему к разрушению. При этом характерные размеры образующихся фрагментов кратны величине инвариантности микроразрушения твердых тел $\boldsymbol{B}_a$.

Как известно, отношение расстояния между трещинами $L_к$ к их размеру $l_к$ характеризует среднее значение скважности $\boldsymbol{K} = L_к/l_к$ в процессе трещинообразо-вания. Таким образом, разрушение наступает в том случае, когда величина скважности $\boldsymbol{K}$ оказывается близкой к дискретно-волновому критерию $\boldsymbol{B}_a = {}^{a}_{B}/\Upsilon\, a[$] 2,1…3,1 , то есть $\lim\limits_{L_k \to {}^{a}_{k}} K = \dfrac{{}^{a}_{k}}{l_k} = \dfrac{{}^{a}_{B}}{\langle \sim \rangle}$. Здесь ${}^{a}_{B}$ имеет смысл наименьшей длины цуга акустической волны при разрыве межатомных связей активированного атома, $\Upsilon\, a[$ – среднее расстояние между атомами в твердом теле.

Отсюда следует, что потеря устойчивости нагруженного тела наступает при совпадении длины ${}^{a}_{K}$ излучаемой волны со средним расстоянием $L_к$ между трещинами. Это и есть авторезонансное условие интенсификации процесса разрушения и диспергирования, так как длительность накачки энергии совпадает с длительностью ее освобождения, а при этом разрыв одной или нескольких межатомных связей является “спусковым крючком” цепного процесса разрыва большого количества связей.

Основными характеристиками разрушения являются: размеры трещин и частиц, амплитуда и длительность сигналов акустической эмиссии (АЭ), активность АЭ и т.д. Каждой стадии развивающегося в нагружаемом теле разрушения соответствует свой акустический образ [5, 6].

Действием критерия $\boldsymbol{B}_a$ объясняется наличие максимумов в распределениях частиц по размерам. Установлено, что гранулометрические характеристики продуктов измельчения в диапазоне размеров частиц от 10^{-5} до 10^{-1} м подчиняются геометрической прогрессии для ряда преимущественных размеров частиц $d_к$ / $d_{к-1}$, и знаменателем прогрессии служит величина дискретно-волнового критерия микроразрушения, то-есть практически $d_к$ / $d_{к-1}$ кратны величине $\boldsymbol{B}_a = {}^{a}_{B}/\Upsilon a[= 2{,}6 \pm 0{,}5$ [3, 10]. Из этого следует, что фрактальная размерность диспергированного продукта связана с дискретно-

волновым критерием разрушения в согласии с автоколебательной концепцией предразрушения [1, 2].

Главный вывод состоит в том, что распределение по размерам элементов атомно-молекулярной структуры является полимодальным, то есть в объеме материала сосуществуют несколько уровней, образующих иерархию атомно-молекулярной самоорганизации конденсированного вещества. Анализ экспериментальных данных, полученных в работах [8, 9], показал, что полимодальность в распределении частиц удается проследить как при разрушении, так и при образовании конденсированной фазы в широком диапазоне масштабов в 15 порядков (10^{-10}…10^{5} м). При этом отношение последовательно расположенных преимущественных размеров на экспериментальной гистограмме также совпадает с величиной дискретно-волнового критерия микроразрушения твердых тел. Повидимому, это общая закономерность устройства объектов материального мира. Таким образом, новый методологический подход к рассмотрению связи диспергирования с микроразрушением, основанный на учете единства дискретных и волновых свойств вещества в конденсированном состоянии, подтверждает определяющую роль дискретно-волнового критерия в возникновении эффектов диспергирования.

Из полученных результатов следует вывод о целесообразности применения дискретно-волнового критерия в качестве модуля классификации при сопоставлении гранулометрических характеристик тонкодисперсных материалов. Физический критерий микроразрушения $\boldsymbol{B}_a$ составляет основу оценки следующих технологических показателей диспергирования: соотношения размеров преимущественных фракций гранулометрических характеристик и удельной поверхности измельченного продукта, степени измельчения, удельного расхода энергии на измельчение [3].

В приведенном ниже соотношении, связывающем эффективную $¥_s$ и теоре-тическую ¥ величины поверхностной энергии, показано влияние критерия $\boldsymbol{B}_a$ на характеристики диспергирования, а также параметра N, характеризующего число элементарных актов излучения при разрывах межатомных связей:

$$¥_s \cong ¥ N \frac{a_B}{\langle a \rangle}; \quad N = ¥ Ya[^2 / h^3 m; \quad N] c/V_B; \quad V_B = h/mYa[, \qquad (1)$$

где h – постоянная Планка; $^3_m = c/Ya[$ – максимальная частота АЭ, c – скорость звука, V_B – предельная амплитуда колебательной скорости атомов, которая для большинства твердых тел составляет $V_B / c = 10^{-3}…10^{-2}$.

Расчеты показывают, что средняя плотность $YW_V[$ энергии при разрывах межатомных связей (размер разрыва l] $Ya[= 10^{-10}$ м) составляет величину: $YW_V[= ¥_s / Ya[= 2{,}6 \cdot (10^6…10^7)$ МДж/м^3; $¥_s = 2{,}6 \cdot (10^2…10^3)$ Дж/м^2 ; N $=10^2…10^3$, ¥ =1…10 Дж/м^2, среднее $B_a = {}^a_B / Y\,a[= 2{,}6$. Различие на 2-3 порядка величин $¥_s$ и ¥ связано с дополнительными затратами энергии на возбуждение автоколебаний атомов.

Об этом свидетельствует экспериментально установленная закономерность *динамического размерного эффекта* разрушения, а именно [11]: $W_B\ d$] $¥_s$; $W_B\ d$] *const*; $¥_s$] $3 \cdot 10^3$ Дж/м^2. Здесь W_B – критическая плотность энергии микроразрушения, которая в значительной степени определяет величину площади поверхности S_p /V тонкодисперсного продукта: $S_p /V \approx (W_B ¦_B) /¥$ ($¦_B$ – квантовый к.п.д. АЭ, V – объем диспергируемого продукта).

Весьма полезной для оценки поверхностной энергии $¥_s$ при микродиспергировании является формула:

$$¥_s = (1 + \frac{m}{2}) ¥ \frac{S_\Sigma}{S} \quad , \tag{2}$$

где m – постоянная, характеризующая потенциальную энергию взаимодействия между атомами твердого тела; S – исходная площадь поверхности диспергируемых частиц.

С автомодельностью и автоколебательной природой процесса разрушения твердых тел связан выбор оптимальной величины степени диспергирования в измельчительном аппарате. Степень измельчения I_{pq} при получении тонкодисперсных порошков может характеризоваться соотношением, включающим дискретно-волновой критерий $B_a = {}^a_B /Ya[$ и показатель диспергирования $~_{pq}$ [3]:

$$I_{pq} = \frac{d_p}{d_q} = (B_a)^{~_{pq}}; ~_{pq} = p - q\,. \tag{3}$$

При статических или слабодинамичных режимах нагружения параметры диспергирования соответствуют наименьшим значениям: I_{pq} ì $^{a}{}_{B}$ /<a> ≈ 2, ~$_{pq}$ = 1…2. При высокодинамичных ("жестких") режимах нагружения эти параметры значительно больше, достигая при взрывных методах разрушения максимальных значений: $I_{pq} = 5 \cdot 10^3$, ~$_{pq}$ = 7…9. Из этого следует, что в процессе измельчения имеет практический смысл задавать время накачки измельчаемых частиц энергией соизмеримым по порядку величины со временем их разрушения, что будет способствовать интенсификации диспергирования. Экспериментально установлено, что степень диспергирования увеличивается пропорционально продолжительности третьей стадии предразрушающего состояния – авторезонанса [3, 5].

Проведенный анализ физических закономерностей разрушения и диспергирования позволяет сделать вывод о целесообразности использования дискретно-волнового критерия микроразрушения и связанных с ним закономерностей для выбора режима диспергирования в производстве тонкодисперсных материалов и нанопорошков.

Список литературы 1. *Бовенко В.Н.* Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук: М.–1990.-30 с. **2.** *Бовенко В.Н.* Основные положения автоколебательной модели предразрушающего состояния твердых тел // ДАН СССР.-1986.- Т. 286, №5. - С. 1097-1101. **3.** *Горобец Л.Ж.* Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс. д-ра техн. наук: НГУ: Днепр-ск. – 2004. - 35 с. **4.** *Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж.* Применение автоколебательной теории разрушения для прогнозирования энергоемкости процесса измельчения твердых тел // ФТПРПИ. – 1986. - № 1. – С. 106-111. **5**. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений / *Л.Ж.Горобец, В.Н. Бовенко, С.Б. Дуброва, О.Ф. Панченко* // Физика и техника высоких давлений. – 1995. - №3. – С. 65-73. **6**. *Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж., Дуброва С.Б.* Явление акустического затишья перед разрушением конденсированных сред.– Синергетика, структура и свойства материалов. Самоорганизующиеся технологии. – М., 1996. - С. 48 - 50. **7**. *Чупрынин В.И.* Разрывные автоколебания в геофизических системах.- М.: Наука, 1983. - 92 с. **8.** *Бовенко В.Н., Старцев В.М.* Дискретно-волновая природа надмолекулярной организации аморфного полимера //Высокомолек. соед., Серия Б. – 1994. – Т. 36, №6. – С. 1004 -1008. **9.** *Бовенко В.Н., Старцев В.М.* Полимерные стекла: новые методологический и методический подходы к описанию и прогнозированию прочностных свойств// Физика и химия стекла. – 1999. – Т. 25, № 1. - С. 107-115. **10**. *Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж.* О проявлении дискретности твердых тел //ДАН СССР. - 1987. - Т. 292, № 5. - С. 1095-1100. **11**. *Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж.* Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения //Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых. - 1986. - № 5. - С. 109-111.

Поступила в редколлегию 27.09.07