

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Ю. А. Веригин, Я. Ю. Веригина

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

*В работе предложен энергетический подход к определению закономерностей процесса измельчения материалов механическим способом.*

**Ключевые слова:** структура вещества, прочность, дислокации, микродефекты, энергия измельчения.

Процесс подготовки исходного сырья для приготовления строительной продукции, изделий в технической керамике, композиционных конструкционных особо прочных деталей, продукции СВС технологий и др. требует получения исходных тонкоизмельченных материалов в виде порошковых сред. Получение подобного сырья осуществляется путем разрушения исходной продукции в измельчителях различного вида.

Измельчение сопровождается процессом разрушения структурных блоков (зерен) исходного сырья (рисунок 1).

Реальные структуры исходных материалов (аморфных либо кристаллических), как правило, имеют дефекты, которые в зависимости от размеров разделяются на следующие уровни.

- макродефекты – макрообъемные дефекты, фиксируемые невооруженным глазом, и находящиеся на поверхности исследуемого объекта;

- мезодефекты – дефекты внутреннего строения вещества на уровне межзернового строения, состава кластерных блоков и т.п.;

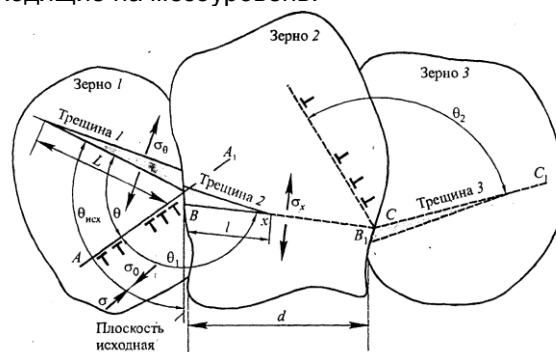
- микродефекты – дефекты на уровне кристаллической решетки вещества, наличие дислокаций, их скоплений и микротрещин.

Особо ценным продуктом материального производства является энергонасыщенная среда, которая по своим свойствам рассматривается как продукт сверхтонкого измельчения [1]. Процесс измельчения сопровождается пластическими деформациями и разрушением первичной мезоструктуры до уровня микроструктуры вещества с последующей организацией на ее поверхности зоны повышенной химической активности, а порой и полного изменения механо-физико-химических показателей. Это способствует получению на их основе нетрадиционных материалов с особыми техническими свойствами.

В процессе измельчения материалов каждая частица среды подвержена силовому ударно-истирающему воздействию. Это создает в ее объеме напряженно-деформированное состояние, локализирующее пластические деформации, рост и слияние микротрещин в микроструктурных блоках макрочастицы (рисунок 2). Эволюционирующая последовательность нагружений приводит к разрушению кластерных блоков частицы, уменьшению их размеров, повышению дисперсности вещества и его поверхностной энергии.

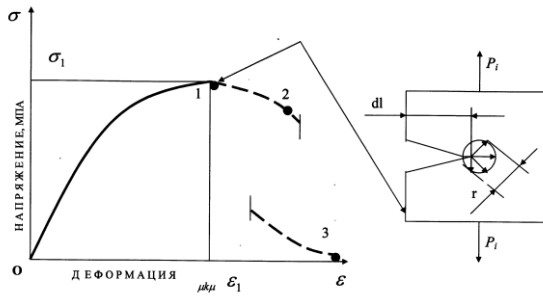
Объединенный процесс разрушения микрочастицы можно проиллюстрировать в следующей последовательности.

При нагружении объекта внешним силовым воздействием  $P$  в нем развиваются упруго-пластические процессы (рисунок 2), переходящие на мезоуровень.



$\sigma$  – внешнее приложенное напряжение;  $T_1$  – возникшая заранее микротрещина в зерне 1;  $AA'$  – плоскость скопления дислокаций в зерне 1;  $BB'$  – плоскость скольжения в зерне 2, составляющая с действующей плоскостью скольжения  $AA'$  в зерне 1 угол  $\Theta = 110^\circ$ ;  $\sigma_0$  – напряжение сопротивления скольжению со стороны матрицы;  $\sigma_x$  – растягивающие напряжения в точке  $x$  по плоскости  $BB'$ ;  $d$  – средний размер зерна;  $l$  – расстояние от границы зерна до точки  $x$  в зерне 2

Рисунок 1 – Модель образования, роста и распространения микротрещин в дислокационных зонах микроструктуры кластерного блока вещества



$dl$  – размер зародившейся микротрещины;  $r$  – радиус поля напряжений у вершины трещины;  $P_i$  – внешняя нагрузка. 1 – точка бифуркации, т.е. физический предел разрушения

Рисунок 2 – Диаграмма состояния твердого тела под воздействием внешнего нагружения

Это интенсифицирует движение дислокационных ансамблей и зарождение микротрещин, которые в последующем обеспечивают их рост, слияние и разрушение вещественной кристаллической решетки по кристаллографическим плоскостям элементарной частицы, что завершается ее разрушением.

Следовательно, процесс пластической деформации и разрушения вещества происходит в несколько стадий:

- подготовительную – накопление поля напряжений;
- образование зародышевых трещин – уплотнение вакансий;
- развитие микротрещины;
- слияние и размножение микротрещин;
- рост магистральной трещины и разрушение структуры.

Для построения математической модели, отражающей всю совокупность описанных явлений и эффектов, представим, что элемент среды  $dV$  подвержен внешнему обобщенному силовому воздействию  $P_i$  (рисунок 2).

При возрастании  $P_i$  в среде происходит накопление внутренней энергии  $dU$  (участок кривой 0-1) и упрочнение материала. В точке 1 имеет место критическое состояние, при котором энергия напряжений превышает потенциальный барьер тела на величину  $dV_{cr}$ , расшатывающую структурную решетку, приводя к зарождению микротрещины размером  $dl$ . В вершинах трещины локализуется поле напряжений радиусом  $r$ , способствующее спонтанному размножению единичных процессов  $J$ , слиянию микротрещин, образованию макродефектов и полной деградации структуры материала (рисунок 2, участок кривой 1-2-3).

Таким образом, наличие источника воздействия  $P_i$  приводит тело в критическое со-

стояние  $\sigma_{TE}$ , при котором наступает разрушение материала. Освобождающаяся в результате этого энергия расходуется на образование новых поверхностей и дефектов в структуре микрообъемов. Другая ее часть рассеивается в виде объемных деформаций, тепла и других микроэффектов. Следовательно, мы имеем дело с необратимым процессом, для которого динамика изменения состояния выражается соотношением

$$\int \frac{du}{dt} dV \leq 0 \quad (1)$$

Приведенное уравнение показывает монотонное приближение состояния объекта разрушения  $dV$  к желаемой форме или размерам, оговоренным условиями и требованиями технологии, например, степенью измельчения или удельной поверхностью.

Энергетическое состояние подобных систем описывается соотношением, которое применительно к рассматриваемым условиям преобразуется к виду

$$-dU = dF - TdQ \quad (2)$$

При этом  $dV$  представляется как внутренняя энергия системы,  $dF$  – свободная или подведенная энергия (работа внешних сил),  $TdQ$  – тепло, подведенное к системе.

В свою очередь, тепло, подведенное к системе, способствует проявлению элементарных тепловых процессов, что, с позиций первого начала термодинамики, выражается соотношением

$$TdQ = dA_{T.P} + dA_q \quad (3)$$

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.).

Подставив (2) в (3), получим

$$-dU = dF - dA_{T.P} - dA_q \quad (4)$$

Отсюда следует, что работа внешнего силового воздействия, необходимая для разрушения конкретного тела, есть величина, определяемая внутренней энергией тела, т.е.  $dF = |dU|$ . При этом наличие работы сил внут-

ренних тепловых деформаций способствует уменьшению работы внешних сил.

Используя представления о молекулярно-кинетических основах, разрушения вещества, можно получить уравнение связи скорости критических условий процесса разрушения со свободной энергией  $dF$  (энергией активации).

Тогда в общем случае можно записать

$$a - 3dVd\zeta dl \rho^* K_m \frac{RT}{h} e^{\frac{dF - dV\sigma_m}{RTN}} = 0 \quad (5)$$

Произведя логарифмирование и решение данного уравнения относительно  $dF$ , имеем

$$dF = dV\sigma_m + NRT \ln \left( \frac{3RT}{ah} K_m \rho^* dVd\zeta dl \right) \quad (6)$$

Принимая вместо  $\sigma_m$  величину  $2\sqrt{\frac{A_F E}{\pi dl}}$ , получим

$$dF = 2dV\sqrt{\frac{A_F E}{\pi dl}} + NRT \ln \left( \frac{3RT}{ah} K_m \rho^* dVd\zeta dl \right) \quad (7)$$

В представлениях теории Гриффитса  $A_F$  есть удельная поверхностная энергия, необходимая для развития трещины  $d\ell$  и образования поверхности  $d\zeta$ .

Приняв форму деформируемого тела близкой к кубической с начальным размером  $\ell$  и поверхностью  $6\ell^2$ , получим, что энергия деформации по Гуку определяется как  $\sigma_m^2 \ell^3 / 2E$ .

В результате разрушения до размеров  $\ell_i$  со степенью измельчения

$$i = \frac{\ell}{\ell_i}$$

получим  $i^3$  тел, каждая из которых имеет поверхность  $6\ell_i^2$ . Тогда вся вновь образуемая поверхность определяется как

$$\zeta = 6\ell_i^2 i^3 - 6\ell^2 = 6\ell^2 (i - 1) \quad (8)$$

В свою очередь

$$A_F = \frac{\sigma_p^2 dl^3}{12E(i-1)}, \quad (9)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности на разрушение, Па.

Подстановкой значения  $A_F$  в уравнение (7) с учетом (8) получено

$$dF = 0,32\sigma_p dV \sqrt{\frac{1}{i-1}} + NRT \ln \left( \frac{18RT}{ah} K_m dVdl^2 (i-1)dl \right), \text{ Дж} \quad (10)$$

Таким образом, работа внешнего силового воздействия складывается из потенциальной энергии среды

$$dA_{\text{II}} = 0,32\sigma_p dV \sqrt{\frac{1}{i-1}} \quad (11)$$

и работы, расходуемой на обеспечение течения внутрискруктурных молекулярно-кинетических процессов в разрушаемом теле

$$dA_k = NRT \ln \left[ \frac{18RT}{ah} K_m \rho^* dVdl^2 dl(i-1) \right] \quad (12)$$

Иными словами

$$dF = dA_{\text{II}} + dA_k \quad (13)$$

Работа сил внутренних температурных напряжений проявляется в результате изменения температуры среды от  $T_0$  до  $T_i$ , и может быть определена по законам термодинамики. При этом тензорная сила внутренних напряжений  $X_v^S$  ограничена пределом прочности материала, поэтому справедливо допустить, что  $X_v^S \equiv \sigma_p$ , тогда

$$dA_{T.P.} = -\sigma_p \beta \Delta T dV \quad (14)$$

Выделившаяся при разрушении тепловая энергия  $dA_q$  определяется как

$$dA_q = -0,239dVc\rho\Delta T, \quad (15)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость среды;  $\rho$  – плотность вещества.

С учетом вышеизложенного, энергия, необходимая для разрушения среды, выражится математической моделью, взаимосвязывающей параметры системы «среда – рабочий орган» следующим образом

$$dA_p = 0,32\sigma_p dV \sqrt{\frac{1}{i-1}} + \\ + NRT \ln \left[ \frac{18RT}{ah} K_m \rho^* dl^3 dl^2 dl(i-1) \right] - \quad (16) \\ - \sigma_p \beta \Delta T dl^3 - 0,239 C \Delta T p dl^3, \text{ Дж.}$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученное уравнение позволяет учесть все сложные и необратимые явления, происходящие при разрушении твердого вещества, и является дополнением к существующим теоретическим моделям Риттингера, Кирпичева-Кика, Ребиндера, Бонда, Баловнева и других ученых, учитывающих один из факторов, влияющих на процессы измельчения материалов.

Предложенная математическая модель процесса разрушения вещества показывает, что процесс диспергирования – активации измельчением – сложный многоступенчатый процесс, связанный с изменением энергетического состояния вещества вследствие его масштабного упрочнения и вскрытия новых химически активных поверхностей твердых нанокластеров.

Нарастание и развитие новых дефектных зон в ультрадисперсных системах, подверженных механическому воздействию, происходит за счет расшатывания дислокационных

структур, образования микротрещин, роста магистральных дефектов и разрушения структурных ансамблей до полной амортизации вещества.

Термодинамический анализ процесса показывает, что энергия разрушения включает в себя сумму энергозатрат, учитывающих создание напряженно-деформированного состояния в структуре вещества, обеспечение экстремальных условий размножения дислокаций и роста микротрещин, образования новых поверхностей в соответствии с требованиями технологии, предписанными степенью измельчения.

Высвободившаяся при этом энергия рассеивается в виде активных тепловых флуктуаций, пассивного тепла и частично переходит в приповерхностную энергию активации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин, Ю. А. Технологические принципы измельчения и активации исходного сырья при изготовлении дорожно-строительных материалов / Ю. А. Веригин, Я. Ю. Веригина, Е. А. Клименко // Материалы международной НТК «Интерстроймех 2007». – 2007. – Самара. – С. 89-92.

**Веригин Ю.А.** – д.т.н., профессор кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: xvergin2005@mail.ru.

**Веригина Я.Ю.** – старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: xvergin2005@mail.ru.