

СВЯЗЬ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ С ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ ОБРАЗЦОВ

Барахтин Б. К., Савенков Г. Г.*

ГУП ЦНИИ КМ «Прометей», С.-Петербург,

* ФГУП НИИ «Поиск», С.-Петербург,

Можно считать надежно установленным, что динамическое откольное разрушение материалов является многостадийным кинетическим процессом, основу которого определяет эволюция дефектов кристаллического строения на субмикро-, микро-, мезо- и макрокопическом масштабных уровнях. Продолжительность и характеристики реорганизации ансамблей дефектов различны на каждом из структурных уровней. Поэтому проблема описания процессов деформации и разрушения с построением адекватной математической модели становится трудно разрешимой.

В решении задач физической кинетики использование концепции самоподобия и принципов фрактальной механики [1] позволяет связать дискретность структурного строения материала, рельеф поверхности разрушения и прочностные параметры среды [2]. Например, в опытах высокоскоростного нагружения мишеней, изготовленных из сталей типа 40X, СП28, 12X18Н10Т плоское соударение с бойком при скоростях 200 – 600 м/с неоднократно приводило к образованию тарелочки откола с фрактальным профилем наподобие фигур Коха [3, 4].

Целью данной работы является построение математической модели, связывающей геометрические характеристики поверхности разрушения, которая образуется в условиях высокоскоростного удара, с динамическими параметрами материала мишени: откольной прочностью и долговечностью.

Систематические исследования профилей трещин откола показали, что по характеристическим размерам участки сдвига и отрыва группируются в пределах следующих масштабных уровней:

- микроуровень, где реализуются структурные перестройки, предшествующие возникновению зародышевых микротрещин размером менее $2 \cdot 10^{-1}$ мкм;
- мезоуровень 1 – область $\sim 2 \cdot (10^{-1} + 10^1)$ мкм), в которой формируются и накапливаются зародышевые микротрещины;
- мезоуровень 2, где размеры трещин укладываются в интервал $2 \cdot (10^1 + 10^3)$ мкм);
- макроуровень, когда длина трещин уже сопоставима с размерами мишени.

При ударном нагружении зародышевые микротрещины образуются в волне растяжения с высокой скоростью, сопоставимой со скоростью продольных звуковых волн [5]. Время, необходимое для их раскрытия, мало – около 0,02 нс. Поэтому на этапе действия волны растяжения вкладом раскрывающихся трещин в долговечность образца можно пренебречь. Следовательно, продолжительность жизненного цикла образца определится ансамблями дефектов кристаллического строения, которые генерируют микротрещины и соответствуют мезоскопическим масштабным уровням 1 и 2. Тогда полная метрическая длина l контура трещины откола составит: $l = \Delta l N$, где Δl – минимальный выбранный размер (масштаб, например, 0,1 мкм) мезодефектов числом N [2]. Вводя в рассмотрение макроскопическую топологическую длину трещины l_1 и ее пространственную размерность D , можем записать: $l = (l_1 / \Delta l)^D \Delta l$. Здесь l_1 – размер трещины, измеренный вдоль прямой между ее крайними точками, D – величина размерности, которая может быть дробной (фрактальной) и определяется посредством соотношения:

$$D = [\lg(l/\Delta l)] / [\lg(l_1/\Delta l)].$$

С помощью приведенных выражений можно получить оценку долговечности t_p образца в волне растяжения:

$$t_p = \alpha(\Delta l / V_{\text{тп}}) N,$$

где $V_{\text{тп}}$ – скорость роста мезодефекта, которая по величине близка к скорости рэлеевских волн c_R [6], α – коэффициент, величина которого находится в интервале (0,5–1). Меньшее значение α соответствует откольному разрушению металлов.

Приведенное соотношение для долговечности t_p говорит о том, что разрушение в условиях откола сопровождается дискретным накоплением мезодефектов, для которых минимальный «квантовый» скачок Δl определяется выбранным масштабом Δl :

$$\Delta l = \Delta l / V_{\text{тп}} = \Delta l / c_R.$$

Далее можно предположить, что продолжительность «квантового» скачка трещины является «структурным» временем t_C , необходимым для реализации акта разрушения со скоростью звука c [7]:

$$t_C = d / c = 2K_1^2 / \pi \sigma c.$$

Здесь K_1 – критический коэффициент интенсивности напряжений, σ – прочность на разрыв бездефектного образца из данного материала, d – линейный размер элементарного объема разрушения.

Поскольку длина магистральной трещины определяется масштабом, числом и пространственной размерностью мезодефектов как:

$$l = \lambda (\Delta l)^D, \quad N = \lambda (\Delta l)^{D-1},$$

то долговечность образца определится формулой вида:

$$t_p = \alpha(\Delta l / c_R) \lambda (\Delta l)^{D-1}.$$

Для исключения из полученного выражения постоянной λ воспользуемся определением длины

$$l = \Delta l (l_1 / \Delta l)^D.$$

Отсюда $\lambda = l_1^D / \Delta l^{2D-1}$. Тогда в окончательном виде долговечность образца определится через масштаб мезотрещин:

$$t_p = \alpha(\Delta l / c_R) (l_1 / \Delta l)^D.$$

Полученное выражение говорит о том, что чем выше значение размерности D , тем больше времени должно быть затрачено на разрушение в волне растяжения.

Известно [8], что без учета упруго-пластических свойств в первом приближении откольная прочность материала σ_p как мера критических напряжений при отрыве в условиях одноосной деформации определяется через параметры движения свободной поверхности:

$$\sigma_p = \rho c_0 (V_0 - V_m) / 2,$$

где ρ – начальная плотность материала, c_0 – объемная скорость звука, V_0 – максимальная скорость свободной поверхности, V_m – скорость свободной поверхности в первом экстремуме в зависимости $V(t)$, t – время. Приведенная формула пригодна для идеального материала без дефектов. С целью учета особенностей во внутреннем строении реального тела с дефектами будем полагать, что под действием ударного импульса нагрузки в процессе полимасштабных перестроек структуры на микроскопическом масштабом уровне к моменту формирования дефектов мезоструктурного масштаба упру-

где параметры мишени преобразуются. Учет суммарной протяженности формирующихся несплошностей введем следующим образом [9]:

$$E_{\text{eff}} = E [1 - \beta \Delta l^{D-1} \langle l \rangle^2] - \text{модуль упругости Юнга,}$$

$$\nu_{\text{eff}} = \nu [1 - \beta \Delta l^{D-1} \langle l \rangle^2] - \text{коэффициент Пуассона,}$$

$$K_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} / 3(1 - 2\nu_{\text{eff}}) - \text{эффективный модуль объемного сжатия.}$$

Здесь β – константа, $\langle l \rangle$ – средний размер мезодефектов в материале.

Полагаем, что полимасштабные перестройки структуры вызывают в материале изменение объема ∂W : $\partial W = \partial W_e + \partial W_d \pm \partial W_p$, где ∂W_e – вклад упругой деформации, ∂W_d – влияние дефектов микро-, мезо- и макроскопического масштаба, ∂W_p – изменения, вызванные процессами релаксации напряжений вследствие пластической деформации. Благодаря малости вкладов от первого и третьего слагаемых, величина ∂W может быть принята близкой к ∂W_d , т.е. $\partial W \sim \partial W_d$. Следовательно, под действием импульса растяжения эффекты дилатации обусловлены, в основном, результатом формирования шероховатой поверхности откола. Тогда, используя связь между средним размером мезодефекта и фрактальной размерностью образующейся поверхности разрушения, можно записать:

$$\partial W \sim \partial W_d = S_p (\mu \eta^{1-D} - 0,3) \langle l \rangle,$$

где μ – константа, η – масштаб наблюдения, $S_p = (\pi/4) l_1^2$ – макроскопическая топологическая площадь поверхности разрушения. При этом эффективное значение плотности материала в волне растяжения будет характеризоваться соотношением:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho / (1 + \gamma \eta^{1-D})$$

Здесь $\gamma = \langle l \rangle \mu / H$, H – толщина образца.

С учетом приведенных формул может быть определена эффективная объемная скорость звука как:

$$c_{\text{eff}} = c \{ (1 - \beta \Delta l^{D-1} \langle l \rangle) (1 + \gamma \eta^{1-D}) / 3 [1 - 2\nu(1 - \beta \Delta l^{D-1} \langle l \rangle^2)] \}^{0,5}.$$

Отсюда следует выражение для оценки откольной прочности:

$$\sigma_p = 0,5 \rho c (V_0 - V_m) \{ (1 - \beta \Delta l^{D-1} \langle l \rangle) / 3 [1 - 2\nu(1 - \beta \Delta l^{D-1} \langle l \rangle^2)] (1 + \gamma \eta^{1-D}) \}^{0,5}.$$

Соотношения, выведенные для долговечности и откольной прочности образца, связывают динамические параметры материала с геометрическими характеристиками поверхности разрушения, которая образуется в условиях высокоскоростного взаимодействия. В них констатируется положительная корреляция между t_p , σ_p и D , которая многократно фиксировалась в экспериментах.

Список литературы

1. Олемской А.И., Флат А.А. Использование концепции фрактала в физике конденсированной среды // Успехи физических наук, 1993. - т.163, №12. - с.1-50.
2. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. - М.: Наука, 1992. - 260 с.
3. Барактин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Динамические и фрактальные свойства стали в условиях высокоскоростного нагружения // Журнал технической физики, 1998. - т.68, №10. - с.43-49.
4. Савенков Г.Г. Фрактально-кластерная модель откольного разрушения // Журнал технической физики, 2002. - т.72, №12. - с.44-48.
5. Алтуков В.Н. Две стадии откола // Физика горения и взрыва. 1985. - №5. - с.122-127.
6. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. - М.: Машиностроение, 1988. - 350 с.

7. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. О концепции структурного времени в теории динамического разрушения // Докл. АН СССР, 1992. - т.324, вып. 5. - с.964-967.
8. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / ред. Иванов А.Г. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. - 540 с.
9. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Механика твердого тела, 1973. - №4. - с. 149-158.

УДК 621.7.01

НАСЛЕДОВАНИЕ И ЦИКЛИЧНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ В СТРУКТУРЕ МЕДИ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Барахтин Б. К., Лебедева Н. В.

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», С-Петербург

Известно [1], что при горячей обработке давлением в металлических материалах одновременно развиваются процессы динамического возврата¹ и динамической рекристаллизации². Особенности кристаллографического скольжения, а точнее, энергия дефектов упаковки, определяют доминирующий процесс и вид образующейся структуры зерен. Например, в металлах с низкой энергией дефектов упаковки (Cu, Ni, γ -Fe и др.) поперечное скольжение и переползание дислокаций – основные механизмы динамического возврата, – затруднены. Поэтому сравнительно легко достигается критическая плотность дислокаций, необходимая для начала динамической рекристаллизации. В результате, в деформированном металле возникают колонии, состоящие из большого числа недеформированных зерен малого размера. Во многом благодаря этому, делается возможным реализация эффекта сверхпластичности, когда металл способен деформироваться на сотни процентов без нарушения сплошности. В стремлении выявить условия проявления динамической рекристаллизации и использовать возможности «сверхпластичного» состояния металла состоит практический интерес экспериментов, связанных с процессами горячей деформации. Поскольку динамическая рекристаллизация зависит от технологических параметров – скорости и температуры деформирования, целью проведенной работы с количественной оценкой структуры зерен явилось нахождение условий горячей пластической деформации при сжатии поликристаллической меди, когда доминирует механизм динамической рекристаллизации.

Методика

В работе использованы цилиндрические образцы диаметром $D_0 = 8$ мм и высотой $h_0 = 10$ мм, изготовленные из технически чистой меди марки М0. Образцы пластически деформировались одноосным сжатием до значений $\epsilon = 0,4$ ($\epsilon_r = \ln(h/h_0)$) в установившемся режиме «Имаш-56» при температуре 900°C в интервале скоростей деформации $\dot{\epsilon}$ ($10^{-3} \div 10^2 \text{ c}^{-1}$). Указанные параметры горячей деформации отвечают условиям установившегося пластического течения многих металлов и типичны при их производственной обработке давлением.

¹ Динамический возврат – процесс восстановления структурного состояния, приводящий к установившемуся пластическому течению металла при постоянных напряжениях.

² Динамическая рекристаллизация – процесс, характеризуемый неоднородным строением зерен и их границ с возникновением колоний из новых зерен.