



ДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЯ

А. А. КОМАРОВСКИЙ

Показано, что достоверную информацию о процессах разрушения кристаллической решетки можно получить только методами акустической эмиссии и тепловыми, которые позволяют решать многие актуальные задачи диагностики и прогнозирования.

It is shown that valid information on the processes of fracture of the crystalline lattice may be obtained only by the methods of acoustic emission and thermal methods, which allows solving many urgent diagnostic and prognostic problems.

В работах [1, 2] показано, что в основание обобщенной теории диагностики и прогнозирования может быть положено термодинамическое уравнение состояния твердого тела

$$PV = sT, \quad (1)$$

где P — внутреннее давление, поддерживающее в объеме V при температуре T динамическое равновесие, которое характеризуется постоянством энтропии s .

Энтропия служит обобщенной характеристикой добротности кристаллической решетки (рис. 1) и зависит от количества атомно-молекулярных (АМ) связей 1, 2, 3, ..., N и их индивидуальной энергии δ [3]:

$$s = kN\delta, \quad (2)$$

$$\delta = -\frac{9}{8} \frac{\theta}{t} + 1 - 3 \ln \frac{\theta}{t} + \frac{\pi^4}{5} \left(\frac{t}{\theta} \right)^3, \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана; t , θ — локальная и характеристическая температуры соответственно.

В формуле (1) s может изменяться как макроскопически — Δs (трещины, пористость, вмятины, царапины, риски, резкие переходы от одной геометрической формы к другой и т. д.), так и микроскопически — ds (характеризует способность АМ структуры к фазовым переходам и служит показателем степени ее совершенства). В арсенале

разработанных методов дефектоскопии [4], насчитывающем более сотни физических методов и тысячи используемых при этом типов приборов [5], всегда найдется такой, с помощью которого можно достоверно оценить макро- или мезоскопическую Δs степень несовершенства структуры. Этого пока нельзя сказать о процессах, протекающих на микроскопическом уровне ds при распаде кристаллической решетки (рис. 1) под влиянием внешних факторов.

На рис. 2 представлена диаграмма состояния любой из N АМ связи (кривая $afcbe$). Она состоит из разгонной ямы afc и тормозного барьера cbe [3]. Внутри первой из них группируются дилатонные (рис. 3, а), а в пределах второго — компрессионные (рис. 3, б) типы связей. Они отличаются различным направлением собственного (спинового) вращения ядер связанных атомов в узле кристаллической решетки (показано стрелкой s на рис. 3). У дилатонов параллельные спины приводят к появлению электростатических сил отталкивания F , а антипараллельные спины у компрессионов — сил притяжения. Поэтому связанные электродинамическими силами компрессионы испытывают дополнительно силу обжатия, а дилатоны — растяжения (на рис. 2 зоны растяжения и сжатия обозначены соответственно знаками «+» и «-»). У металлов и сплавов преобладающая часть связей принадлежит к компрессионному типу (кривые 1–5 на рис. 2), а у естественных и искусственных камней — к дилатонному типу (кривые 6–8).

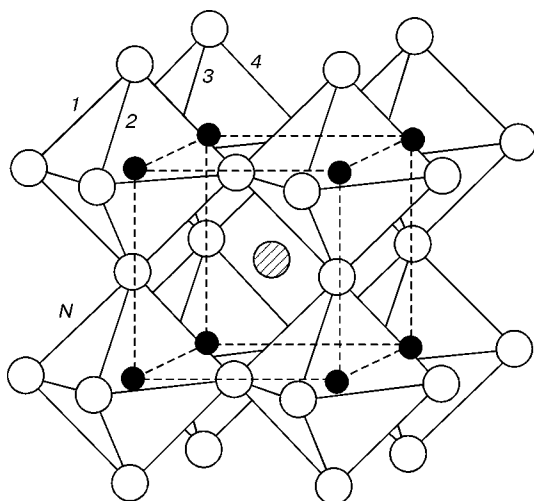


Рис. 1. Кристаллическая решетка с межатомными связями (1, 2, ..., N — номер связи)

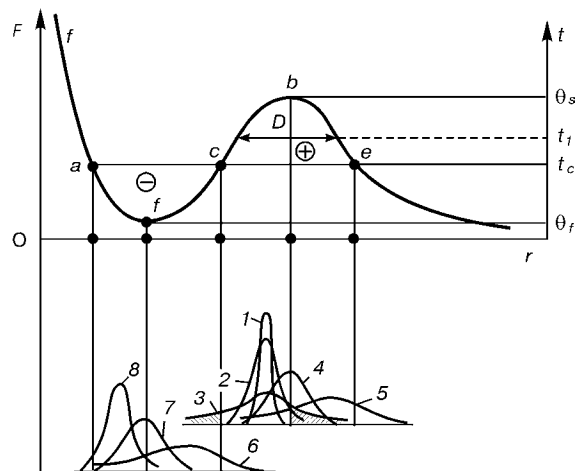


Рис. 2. Диаграмма состояния межатомной связи (t — локальная температура микрообъема)



Дилатоны располагаются в низкотемпературной, а компрессионы — в высокотемпературной области температурного спектра [6]. Излучая фононы и снижая локальную температуру, компрессионы могут оказаться в дилатонной области, а дилатоны переходить в компрессионную зону не могут. Поэтому под влиянием внешних факторов дилатоны разрушаются хрупко, а компрессионы переходят в дилатонную область в процессе пластического деформирования.

На рис. 4 изображен узел кристаллической решетки (рис. 1), который состоит из вращающихся по эллиптическим орбитам атомов 1 и 2, радиус-векторы которых равны соответственно \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 ; а $D = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$. При динамическом равновесии выполняется условие $D = \text{const}$, которому соответствует локальная температура t_1 (рис. 2). Поглощение (уменьшение отрезка D и приближение t_1 к характеристической температуре θ_s) и испускание фононов (увеличение D и стремление t_1 к температуре фазовых переходов t_c) выводит электромагнитный диполь D из состояния устойчивого равновесия.

Диполь D излучает электромагнитные волны, электрическая E и магнитная H компоненты которых определяются следующими формулами [3, 6]:

$$E = \frac{1}{c^2 R} [[\ddot{D} \mathbf{n}]\mathbf{n}], H = \frac{1}{c^2 R} [\ddot{D} \mathbf{n}], \quad (4)$$

где R — расстояние от центра поля O (рис. 4) до точки измерения напряженностей E и H полей; c — скорость света; \mathbf{n} — единичный вектор в направлении R ; \ddot{D} — вторая производная, характеризующая ускорение изменения размеров диполя D .

Изменения параметров локального электромагнитного поля (4) сопровождается вариацией сил связи [3, 6], управляющих процессами трансформации и распада кристаллической решетки:

$$F = eE + \frac{e}{c} [\dot{D} H], \quad (5)$$

где e — заряд взаимодействующих ядер 1 и 2 (рис. 4); \dot{D} — первая производная.

При попадании тела во внешнее (например, силовое) поле напряженностью σ (рис. 3) хаотически расположенные связи вначале ориентируются по полю (рис. 5, а), а затем пластически деформируются (рис. 5, б) [6]. Происходит дифференциация размеров диполей D в зависимости от их расположения по отношению к направлению внешнего поля. В плоскостях I и II (располагаются перпендикулярно σ) связи излучают фононы, при этом температура t_1 приближается к точке θ_s (рис. 2). В плоскостях III–VI (расположены по полю) связи

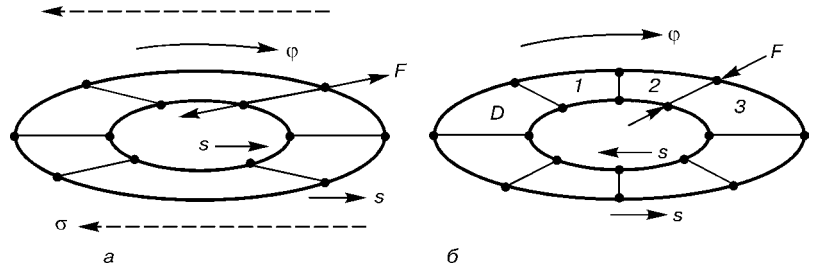


Рис. 3. Дилатонные (а) и компрессионные (б) типы связей в кристаллической решетке: ϕ — орбитальная скорость вращения атомов; F — сила; 1, 2, 3, ... — последовательные положения диполя

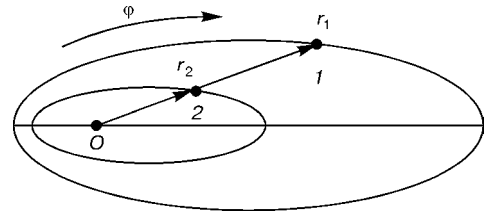


Рис. 4. Электромагнитный диполь D

поглощают эти фононы и увеличивают свои размеры, а t_1 стремится к t_c . В результате одна их часть оказывается в дилатонной области (левая заштрихованная зона на рис. 2), а другая распадается при температуре θ_s (правая заштрихованная зона на рис. 2).

Действительно, полный дифференциал от (1) с учетом (2) равен

$$PV \left(\frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} \right) = kNT \delta \left(\frac{dN}{N} + \frac{dT}{T} + \frac{d\delta}{\delta} \right). \quad (6)$$

Видно, что отклонение от равновесного состояния проявляется через деформирование dV/V и изменение сопротивления dP/P , сопровождающееся уменьшением числа связей dN/N , тепловым излучением dT/T и нарушением индивидуальной энергетики связей $d\delta/\delta$ согласно формуле (3).

Характер разрушения определяется мощностью потока отказывающихся связей. Разрушение от статического растяжения обычно вызывает сокращения площади поперечного сечения образца вблизи места разрушения, так как $N_{\theta_s} > N_{\theta_f}$. Это особенно

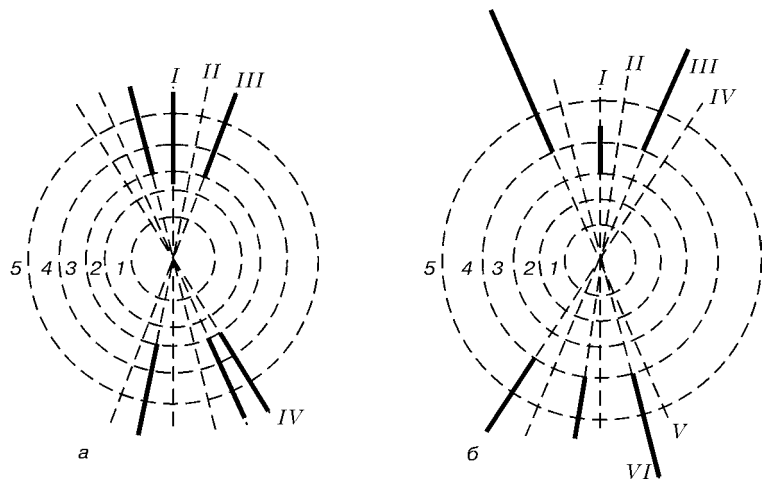


Рис. 5. Упругое (а) и пластическое (б) деформирование межатомных связей: 1–5 — номер орбиты электронов

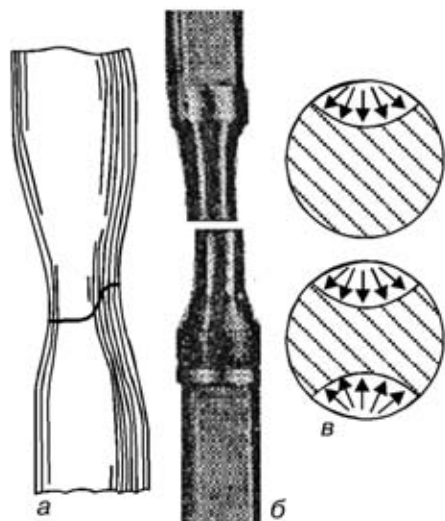


Рис. 6. Разрушение образца: а — от осевого растяжения; б — усталостное разрушение; в — схемы усталостного излома

заметно при испытании пластичных материалов (рис. 6, а). При усталостном разрушении [7] сокращение площади сечения не наблюдается (рис. 6, б), так как $N_{\theta_s} \approx N_{\theta_f}$. Поверхность усталостного излома, как правило, имеет две зоны: собственно усталостного разрушения, формирующегося за счет распада дилатонной фазы при температуре θ_f и окончательного разрушения (долома) при температуре θ_s (заштрихованная область на рис. 6, в). Внешний вид поверхности зоны усталостного излома (незаштрихованные области на рис. 6, в) обычно характеризуется мелкозернистостью металла, изменением цвета металла и наличием гладкого, как бы полированного, участка. Зона долома имеет крупнозернистую структуру. Это объясняется тем, что дифференциал $d\delta$ энергетического члена (формула (3)) содержит слагаемые, характеризующие изменение локальной температуры dt/t и степень трансформации $d\theta/\theta$ кристаллической решетки (рис. 1) [3].

Время устойчивого существования межатомной связи определяется термодинамическим диапазо-

ном θ_f, θ_s (рис. 2). При попадании электромагнитного диполя в дилатонную зону его температура почти мгновенно становится равной θ_f , и он разрушается. В компрессионной зоне непрерывно идет процесс пластического (теплового) деформирования — вплоть до температуры θ_s . При этом интервал θ_f, θ_s не превышает 15...20 % [6]. При критических температурах θ_f или θ_s межатомная связь распадается, высвобождая импульс кинетической

$$q_1 = k\theta \quad (7)$$

и ультразвуковой

$$q_2 = \frac{k}{h} Dm\theta^2 \quad (8)$$

энергии [1], где h — постоянная Планка; m — масса взаимодействующих атомов.

Итак, о процессах, протекающих в кристаллической решетке, можно судить только по уровню акустической эмиссии (АЭ) и изменению теплового поля (6). Если метод АЭ фиксирует конечную стадию этих процессов dN/N , то по результатам анализа теплового поля $d\delta/\delta$ можно прогнозировать ранние стадии энергетической перестройки структуры [1].

1. Комаровский А. А. Диагностика напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 2. — С. 22–27.
2. Комаровский А. А. Прогнозирование остаточного ресурса и долговечности // Там же. — 2000. — № 12. — С. 8–12.
3. Komarovskiy A. A. Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures. — Boca Raton: CRC Press, 2002. — 696 p.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х т. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1976.
5. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика безопасности // Завед. лаб. Диагностика материалов. — 1998. — № 1. — С. 16–22.
6. Комаровский А. А. Физика деформирования и разрушения // Прикл. физика. — 2001. — № 1. — С. 88–132.
7. Комаровский А. А. Усталость: физическая природа, прогнозирование, предотвращение и снятие // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 1. — С. 35–41.

Науч.-инж. центр нетрадиц. технологий «САЛЮТА»,
Киев

Поступила в редакцию
02.10.2002

Внимание разработчиков новых приборов, методов и технологий, а также подписчиков журнала!

Редколлегией журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» принято решение открыть информационную рубрику «Новые приборы и разработки». В кратком изложении мы будем публиковать сведения о новых приборах, научно-технических разработках, методиках и технологиях в области неразрушающего контроля и технической диагностики, а также технического контроля на предприятиях. Для публикации необходимо передать в редакцию описание разработки и иллюстративный материал.