

УДК 539.375

© 1999 г. А.В. БАХТИН, Г.А. БУДЕНКОВ, О.В. НЕДЗВЕЦКАЯ

О ПРЕДЕЛЬНЫХ СКОРОСТЯХ РАЗРУШЕНИЯ

Процесс разрушения рассмотрен с энергетических позиций с учетом затрат энергии, идущей на излучение акустических волн в процессе образования и развития трещин. Показано определяющее значение излучаемых трещиной акустических волн в решении вопроса о существовании предельных скоростей разрушения. Для этих целей разработана физическая модель процесса роста трещины, позволяющая определить параметры полей излучаемых при этом волн акустической эмиссии, и создан соответствующий программный комплекс для расчетов. Предложена методика оценки возможных скоростей роста трещины в зависимости от уровня предварительного нагружения. Оценена предельная скорость роста трещины в трансформаторной стали.

Важным направлением исследования природы разрушения материалов является изучение завершающего этапа – распространения разрушающей трещины. Результаты таких исследований могут использоваться для обеспечения прочности, надежности и долговечности конструкций путем разработки различных физических методов торможения трещин, и методов управления траекторий их движения [1]. Последние могут использоваться в технологиях, основанных на управляемом разрушении (разработка горных пород, резанье металлов и т.д.).

Одним из принципиальных вопросов завершающего этапа разрушения является вопрос о максимальных (предельных) скоростях трещин [2]. В [2] приведены данные многочисленных экспериментальных измерений предельных скоростей трещин, выполненных различными авторами, из которых следует, что отношение скорости трещин V к скорости продольных ультразвуковых волн C_l колеблется в широких пределах – от 0,18 до 0,7–0,9. Это отношение зависит от материала, условий нагружения, способов инициирования трещин. Теоретические оценки различных авторов дают следующие значения для максимально возможных скоростей распространения разрушения в твердом теле: $V_{\max} = 0,38(E/\rho)^{1/2}$, $V_{\max} = 0,4(E/\rho)^{1/2}$, $V_{\max} = 0,57C_l$, $V_{\max} = (0,53–0,61)C_l$ либо $V_{\max} = C_R$ (E – модуль упругости, ρ – удельная плотность материала, C_l – скорость поперечных волн, C_R – скорость рэлеевских волн).

Заключительная стадия процесса разрушения характеризуется быстрым распространением магистральной трещины (или семейства разветвленных трещин), т.е. является существенно динамическим процессом, а следовательно не может быть изучена на основе достаточно разработанных квазистатических моделей [3]. Распространение магистральной трещины сопровождается нарастанием упругих напряжений до значения предела текучести и быстрой их релаксацией до нуля (после прохода фронта трещины), что неизбежно вызывает излучение акустических волн значительной интенсивности. Затраты энергии, идущие на излучение акустических волн необходимо при оценке энергии, расходуемой в процессе движения трещины, в особенности в области больших скоростей разрушения, когда скорость роста трещины превышает какую-либо из скоростей звука (C_s , C_l), т.е. когда возникают условия для синфазного излучения акустических волн окрестностью фронта трещины.

С этой целью в данной работе рассчитаны акустические поля продольных и поперечных волн, генерируемых быстрой трещиной в условиях нормального разрыва в безграничном пространстве. Сделаны оценки энергии продольных и поперечных волн в зависимости от скорости трещины, условий предварительного нагружения, упругих и прочностных свойств материала, показано определяющее значение излучаемых трещиной акустических волн в существовании предельных скоростей разрушения.

Исследование процессов излучения упругих волн растущей трещиной выполняется на базе физической модели, в основу которой положен смешанный аналитико-экспериментальный подход. В соответствии с моделью сформулирована задача об излучении акустических волн растущей трещиной в математической постановке. При этом в модель закладываются экспериментальные данные о процессе разрушения, полученные методами количественной фрактографии, рентгенографическими и другими [1, 4].

Предполагается, что трещина растёт скачком, величина которого $2a$ определяется из фрактограмм, соответствующих определенным режимам нагружения данного материала. При этом рассчитывается акустическое поле линейного участка устья трещины протяженностью $2b$. Картина пространственного распределения механических напряжений в окрестности устья трещины $\sigma(r)$ представлена на фиг. 1 (σ_n – амплитуда предварительного нагружения; r – расстояние от устья трещины до точки наблюдения; σ_p – предел пластичности материала; r_p – радиус области зоны пластической деформации на берегах трещины).

Представленная на фиг. 1 область пространственного распределения напряжений $\sigma(r)$, движущаяся в материале со скоростью V является причиной возбуждения волн акустической эмиссии (АЭ). При этом, движение напряженной области определяет зависимость напряжений от времени $\sigma(t)$ в каждой фиксированной точке пространства в окрестности траектории трещины, являющейся источником волн АЭ (фиг. 2).

Задача о вычислении полей смещений (напряжений) в объемных (продольных и поперечных) волнах весьма трудоемка, но может быть решена достаточно корректно с использованием решений для полей элементарных источников типа сосредоточенных сил [5]. Результирующее акустическое поле определяется как результат действия совокупности точечных источников типа вертикальных сосредоточенных сил, действующих в направлениях $\pm Z$ (фиг. 3).

Смещения в упругих волнах, излучаемых совокупностью точечных источников, находятся согласно принципу суперпозиции посредством интегрирования формул для точечного источника по координатам x и y в пределах $\pm a$, $\pm b$ соответственно. При этом учитываются временные (фазовые – для отдельных гармонических составляющих) задержки, определяемые координатами приложения сил и скоростью их перемещения V .

Интегрирование приводит к следующим выражениям для амплитуд смещений гармонических составляющих в поперечной U_i и продольной U_l волнах

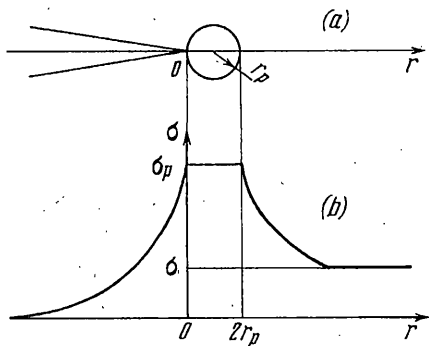
$$U_i = \frac{2F_0 ab}{\pi \mu r} \sin \theta H_i(\omega) \quad (1)$$

$$H_i(\omega) = - \frac{\sin x_l}{x_l} \frac{\sin y_l}{y_l} \sin(2k_l r_p \cos \theta) \quad (2)$$

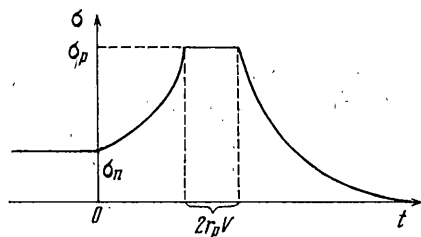
$$U_l = \frac{2F_0 ab \gamma^2}{\pi \mu r} \cos \theta H_l(\omega) \quad (3)$$

$$H_l(\omega) = - \frac{\sin x_l}{x_l} \frac{\sin y_l}{y_l} \sin(2k_l r_p \cos \theta) \quad (4)$$

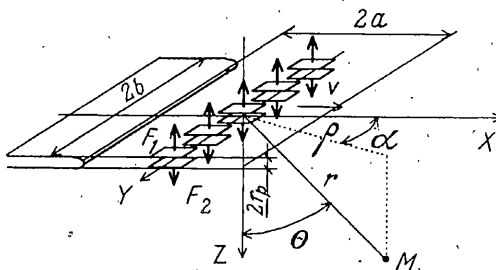
Здесь F_0 – амплитуда силового гармонического воздействия; $x_{l,i} = a(k_p - k_{l,i} \sin \theta \cos \alpha)$; $y_{l,i} = b k_{l,i} \sin \theta \sin \alpha$; $k_p = \omega/V$ – волновой вектор пластической волны



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

(движения зоны пластической деформации со скоростью V); $k_{l,t}$ – волновой вектор продольной или поперечной волны; $\gamma = C_t/C_l$; μ – модуль сдвига; r – расстояние от источника АЭ до точки наблюдения; θ – угол в сферической системе координат, α – полярный угол цилиндрической системы координат (фиг. 3).

Выражения $H_{t,l}(\omega)$ связывают амплитуду смещений в упругой волне с амплитудой силового воздействия при гармоническом режиме, т.е. с амплитудой отдельных спектральных составляющих, совокупностью которых может быть представлен произвольный сигнал со спектральной плотностью $F_0(\omega)$. Для силового воздействия произвольной формы $H_{t,l}(\omega)$ представляют собой пространственно-частотную (передаточную) функцию процесса излучения упругих волн растущей трещиной. Произведение спектральной плотности силового воздействия $F_0(\omega)$ на передаточную функцию процесса излучения $H_{t,l}(\omega)$ представляет собой спектральную плотность импульса АЭ. Чтобы получить форму импульса акустической волны во временной области нужно применить к данному произведению обратное преобразование Фурье

$$U_{t,l}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_0(\omega) H_{t,l}(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(t) e^{-i\omega t} dt \right) H_{t,l}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

Аналитическое решение интеграла (5) не представляется возможным ввиду сложности подынтегральных выражений. Поэтому используется численный метод вычисления данного выражения с применением алгоритма быстрого Фурье-преобразования (БПФ) [6].

Для расчета и визуализации формы и параметров импульса смещений в упругих волнах написана компьютерная программа. Программа позволяет варьировать при расчетах практически все параметры, входящие в вычислительные формулы.

Входными параметрами для расчета являются: характеристики материала упругой среды (плотность ρ , скорость продольной волны C_l , скорость поперечной волны C_t ,

предел текучести σ_p , величина скачка трещины $2a$, ширина прямолинейного участка устья трещины $2b$, амплитуда предварительного нагружения σ_n , скорость роста трещины V , координаты точки наблюдения (θ, α, r) , частотные характеристики регистрирующей аппаратуры (центральная частота, полоса частот) (предполагается, что частотная характеристика – горизонтальная).

В результате могут быть получены следующие зависимости для продольной и поперечной волн: зависимость силового воздействия от времени $\sigma(t)$; спектральная плотность силового воздействия $F_0(\omega)$; передаточная функция процесса $H_{l,r}(\omega)$; спектральная плотность импульсов акустических волн $U_{l,r}(\omega)$; импульсы акустических волн $U_{l,r}(t)$ (зависимость амплитуд смещений от времени); распределение амплитуд смещений в упругих волнах в пространстве $U_{l,r}(r, \alpha, \theta)$.

В процессе формирования акустических полей продольных и поперечных волн можно выделить два возможных варианта. При малых (дозвуковых) скоростях движения фронта трещины имеет место несинфазное излучение волн, характеризующееся слабой направленностью (точнее ненаправленностью излучения) и относительно малыми интенсивностями волн вдали от источника (фронта трещины) (фиг. 4, а; $V = 1000$ м/с). Типичным примером таких процессов является рост усталостных трещин. При превышении значения скорости фронта над значением скорости поперечной волны наблюдается синфазное излучение поперечных волн, характеризующееся узкой направленностью и увеличением интенсивности волн на 4...6 порядков в направлении максимума излучения по сравнению с интенсивностью несинфазного излучения (фиг. 4, б; $V = 3500$ м/с). При этом продольные волны излучаются несинфазно. При превышении скорости фронта над скоростью продольных волн (если бы это было возможно) наблюдалось бы синфазное излучение как продольных, так и поперечных волн, характеризующееся узкими лучами, направления которых определяются как $\theta_t = \arcsin(C_t/V)$ и $\theta_l = \arcsin(C_l/V)$, где θ_t и θ_l – углы максимального излучения поперечных и продольных волн, C_t и C_l – скорости поперечных и продольных волн, V – скорость движения фронта трещины. Синфазное излучение касается, в основном, завершающего этапа разрушения, то есть быстрых разрушающих трещин, развивающихся со сверхзвуковыми скоростями.

При синфазном излучении ($V > C_l$) наблюдается резкий рост энергии акустических волн. В связи с этим целесообразно рассматривать процесс разрушения с энергетических позиций.

Процесс роста трещины логично представить следующим образом. Единственным источником энергии, обеспечивающим протекание процесса, является энергия упругой деформации материала W за счет предварительного нагружения. В простейшем случае (в отсутствии остаточных напряжений при одноосном нагружении) она определяется как

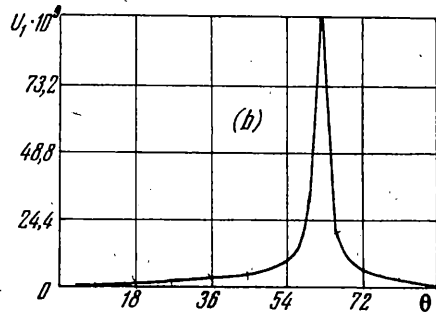
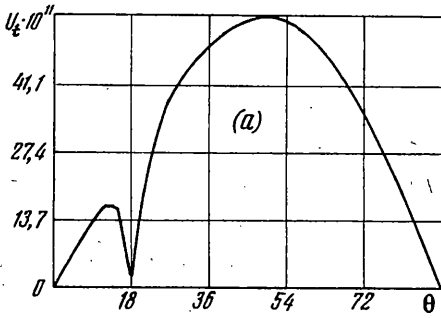
$$W = \frac{1}{2} \sigma_n^2 \Delta V / E \quad (6)$$

где σ_n – напряжение предварительного нагружения; E – модуль упругости, ΔV – рассматриваемый объем напряженного материала.

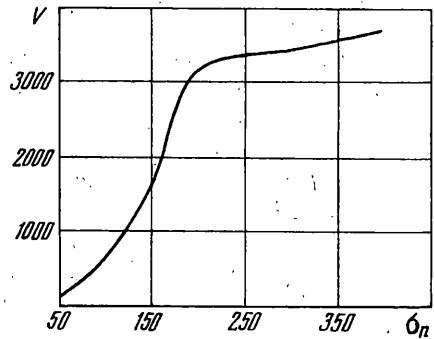
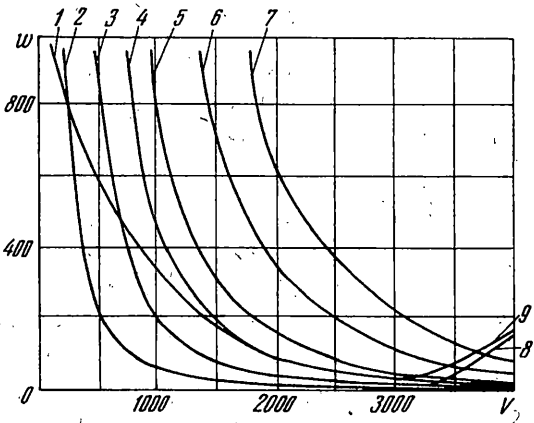
Образование трещины сопровождается потерей энергии на образование свободных поверхностей W^1 , образование зон пластической деформации по берегам трещины W^2 , энергией, уносимой излучаемыми акустическими волнами W^3 . Процесс роста трещины возможен, если

$$W \geq W^1 + W^2 + W^3 \quad (7)$$

Это соотношение позволит получить важные результаты лишь тогда, когда каждый из входящих в него видов энергий может быть представлен как функция скорости V с учетом механических свойств материала и величины предварительного нагружения.



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 6

Энергия образования свободных поверхностей не зависит от скорости трещины и оценивается плотностью $\gamma^1 \approx 1$ Дж/м² [3].

Энергия пластической деформации может быть получена как функция скорости на основе многочисленных экспериментальных данных по пластической деформации и плотности дислокаций, полученных методами количественной фрактографии [2, 4].

Энергия акустических волн может быть рассчитана на основе предложенной модели и программы расчета. Энергия упругой деформации W , идущая на процесс роста трещины, существенно зависит от скорости трещины и может быть вычислена для данного материала и уровня предварительного нагружения как функция скорости трещины при помощи предложенной модели и программы.

Таким образом, представляя компоненты неравенства (7) как функции скорости роста трещины, можно определить области возможного роста трещины и предельные значения скоростей роста в зависимости от свойств материала и уровня предварительного нагружения. При исследовании процессов роста быстрых (разрушающих) трещин на базе предложенного подхода использована следующая методика.

Расчет проведен для участка макротрещины в трансформаторной стали с размерами $2b \times 2a = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Размеры выбраны из следующих соображений. С одной стороны, площадка должна быть достаточно малой по сравнению с общей площадью макротрещины, что позволит достаточно точно представить энергетику макротрещины произвольной формы и размеров. С другой стороны, исследования энергии акустических волн при синфазном излучении удобно проводить при достаточно больших волновых размерах источника.

При $\Delta S = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ энергия образования двух свободных поверхностей составит $W^1 = 2\gamma^1 \Delta S = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$.

Энергия пластической деформации определяется как работа силы $F = \sigma_p \Delta S$ при перемещении на величину смещений вследствие пластической деформации ΔZ :

$$W^2 = \sigma_p \Delta S \Delta Z \quad (8)$$

где σ_p – предел пластичности материала; $\Delta Z = r_p \epsilon_p$, r_p – радиус зоны пластического деформирования, ϵ_p – остаточная относительная деформация, образующая в результате пластического деформирования зоны, ограниченной r_p . Максимальные значения ϵ_p при малых скоростях трещины оцениваются в 5...6% на поверхности излома, в 1,6...2% – на глубине примерно 30 мкм и спадают до 0 на $r_p = 150 \text{ мкм}$ [2]. Увеличение скорости уменьшает значение ϵ_p и r_p . Степень уменьшения определялась по изменению плотности дислокаций в зависимости от скорости [2]. На фиг. 5 кривой 1 представлена зависимость от скорости V удельной энергии w^2 (энергии, приходящейся на 1 м^2 площади образовавшегося участка макротрещины).

При вычислении доли энергии упругой деформации W , идущей на поддержание процесса роста трещин, необходимо учитывать зависимость объема ΔV в формуле (6) от скорости V , обусловленную следующими причинами. Если в окрестности некоторой точки упругой среды (точка фронта трещины) происходит процесс на протяжении времени τ_{Π} , сопровождающийся поглощением энергии, а окружающее пространство заполнено равномерно запасом упругой энергии, то на поддержание процесса энергия может поступать из объема, ограниченного радиусом $R = \tau_{\Pi} C_l$, где τ_{Π} – время процесса, C_l – скорость распространения продольных упругих волн в данной среде. Таким образом, объем ΔV в формуле (6) определяется временем процесса образования трещины в фиксированной точке, проходимой ее фронтом. Длительность процесса определялась как $\tau_{\Pi} = 1/f_{\Pi}$, где f_{Π} – основная частота энергетического спектра силового воздействия. Это время определяется скоростью роста трещины (см. фиг. 2). На фиг. 5 кривыми 2–7 представлены зависимости части удельной упругой энергии w , идущей на поддержание процесса роста трещин от скорости V при разных уровнях предварительного нагружения в трансформаторной стали: $\sigma_n = 50, 100, 150, 200, 300, 400 \text{ МПа}$; кривая 8 соответствует удельной энергии акустических волн w^3 , а кривая 9 – суммарной удельной энергии $w^2 + w^3$.

При расчете энергии акустических волн учитывались следующие обстоятельства. В общем случае излучаются три типа волн: объемные (поперечные, продольные), распространяющиеся в среду, окружающую устье трещины, и рэлеевские, распространяющиеся вдоль берегов образовавшейся трещины. Энергия упругих волн определяется как сумма энергий всех трех типов волн. Как отмечалось ранее, при $V > C_l$ возникает синфазное излучение поперечной волны. Во всех других случаях излучение несинфазное. В частности, синфазное излучение волн Рэлея было бы возможно лишь в том случае, если источник (фронт трещины) двигался бы в направлении распространения волны и со скоростью волн Рэлея. В данном случае движение фронта происходит в противоположном направлении. Поэтому ни при каких значениях скорости фронта трещины не соблюдается условие синфазного излучения волн Рэлея.

Таким образом, процесс роста трещины сопровождается несинфазным излучением продольных, поперечных и рэлеевских волн в диапазоне скоростей от 0 до C_l и синфазным излучением поперечных волн и несинфазным – продольных и рэлеевских – при $C_l < V < C_l$.

Энергию импульса упругой волны считаем приблизительно равной энергии одного периода основной частоты спектра импульса f_i и определяем как

$$W^3 = J S \tau_i \quad (9)$$

$$J = \frac{1}{2} U^2 (2\pi f_i)^2 \rho C_l \quad (10)$$

где J – интенсивность гармонической упругой волны с частотой f_i , U – амплитуда упругого импульса смещений в волне, ρC_i – волновое сопротивление среды, S – площадка, в пределах которой интенсивность равна J , $\tau_i = 1/f_i$ – длительность упругого импульса.

При расчете учитывалось пространственное распределение смещений в волнах, изучаемых источником (трещиной). В случае несинфазного излучения излучается сферическая волна в широком спектре углов $\Delta\theta$ (фиг. 4, *a*), и площадка S определяется как часть площади поверхности сферы с радиусом, вырезаемым телесным углом $\Delta\theta$, где r – расстояние от источника до точки наблюдения. За U принимается среднее значение смещений в диапазоне углов $\Delta\theta$.

При синфазном излучении формируется поперечная волна с остро выраженным максимумом излучения (фиг. 4, *b*). Расчет удобно проводить для ближней зоны в пределах которой распространяется плоская волна. При этом S в (10) определяется как проекция элемента микротрещины на плоскость, перпендикулярную направлению максимального излучения.

Расчеты показывают, что акустическая энергия при несинфазном излучении составляет примерно $10^{-5} \dots 10^{-4}$ Дж ($0,4 \dots 4$ Дж/м²). При синфазном излучении наблюдается резкое возрастание энергии с ростом скорости (кривой 8 на фиг. 5 представлена зависимость удельной акустической энергии w^3 от скорости движения фронта трещины V).

На фиг. 5 можно выделить области возможных скоростей роста трещин в зависимости от уровня предварительного нагружения σ_n . Так при $\sigma_n = 50$ МПа трещина не может распространяться со скоростью выше 250 м/с, так как правее точки пересечения кривых 1 и 2 значение энергии пластической деформации (кривая 1) оказывается больше значений энергии упругой деформации (кривая 2) (энергия акустических волн в этом случае пренебрежимо мала). Следовательно, потребляемая энергия превышает возможный приток энергии, что свидетельствует о невозможности протекания процесса. Увеличение уровня σ_n (увеличение уровня запасенной энергии) ведет к росту возможных значений скоростей.

Характер зависимости $V(\sigma_n)$ представлен на фиг. 6. При дозвуковых скоростях роста их значение определяется энергией пластической деформации и уровнем нагружения. При превышении V над скоростью C_l , значения скоростей трещин определяются суммарной энергией акустических волн и пластической деформации (кривая 9 на фиг. 5) и уровнем предварительного нагружения. При этом диапазон возможных скоростей, определяемых энергией пластической деформации ($V < C_l$), весьма широк и зависимость $V(\sigma_n)$ носит неустойчивый характер. Зависимость $V(\sigma_n)$ в зонах, определяемых в основном акустической энергией ($V > C_l$), достаточно точно определена и охватывает небольшой диапазон скоростей.

Согласно фиг. 5 для трансформаторной стали скорость трещины может достигать скорости звука при уровнях предварительного нагружения более 200 МПа. Предельное значение скорости трещины для трансформаторной стали не может превышать 3700 м/с ($1,3 C_l$), так как кривая 7 фиг. 5 построена для уровня предварительного нагружения $\sigma_n = 400$ МПа, близкого к пределу текучести данного материала ($\sigma_p = 425$ МПа) и дальнейшее увеличение этого уровня практически невозможно.

Следует отметить, что в материалах, где характер разрушения близок к хрупкому (энергия пластической деформации – мала), возможные скорости роста трещин при прочих равных условиях могут иметь большие значения, чем в случае более вязкого разрушения.

Учитывая, что кинетика процесса распространения трещины связана с основами теории прочности и разрушения, информация о таких феноменологических особенностях движения трещины как возможные и предельные скорости перемещения фронта трещин имеет принципиальное значение и представляется достаточно важной.

Представленный подход может быть использован для исследования других закономерностей процессов разрушения. Так упругие напряжения в излучаемых и отраженных от границ объекта волнах, предшествуя фронту трещины и складываясь с внутренними напряжениями, вызванными предварительным нагружением, могут создавать дополнительную концентрацию напряжений, предопределяя таким образом дальнейшее развитие процесса разрушения, например ветвление трещин.

Предложенная методика и полученные результаты могут также использоваться при планировании экспериментов по исследованию процессов разрушения для предварительных оценок скоростей роста трещины.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда Сороса и правительства Российской Федерации (грант J3N100).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия, 1977. 359 с.
2. *Финкель В.М.* Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
3. *Партон В.З., Борисковский В.Г.* Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988. 239 с.
4. *Иванова В.С., Шанявский А.А.* Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия, 1988. 399 с.
5. Физические методы испытания материалов и веществ. / Под ред. Г.А. Буденкова. Челябинск: Политехн. ин-т, 1983. 123 с.
6. *Марпл С.Л. – мл.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.

Ижевск

Поступила в редакцию
25.07.1997