

В. А. ПЕТРОВ, А. В. САВИЦКИЙ

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ПРИРОДА РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА ПРОЧНОСТИ

(Представлено академиком С. Н. Журковым 20 III 1975)

Размерный эффект прочности (р.э.), т. е. увеличение сопротивления разрушению образца при уменьшении его размеров, известен давно и обнаружен ⁽¹⁻⁴⁾ на различных материалах (металлы, стекла, полимеры). Этот эффект широко используется в технике при изготовлении композиций из микроволокон. Однако несмотря на многочисленные попытки ⁽⁵⁻⁸⁾, физика р.э. (называемого также масштабным фактором) не выяснена. Наиболее последовательная статистическая теория опаснейшего дефекта — концентратора напряжений ⁽¹⁾.

1. В данной работе развивается указанный в ⁽⁹⁾ новый подход к объяснению природы р.э., основанный на кинетической концепции разрушения ^(10, 11). Эта концепция, согласно которой разрушение определяется напряженностью механического поля, а ведется тепловыми (энергетическими) флуктуациями, опирается на эмпирическую формулу для долговечности $\tau(\sigma, T)$ образца под нагрузкой при заданном уровне напряжения σ и температуре T :

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}, \quad (1)$$

где U_0 — энергетическая константа материала, γ — структурно-чувствительный коэффициент, характеризующий величину локальной концентрации напряжений, τ_0 — период тепловых колебаний атомов.

Согласно эксперименту ⁽¹²⁾, макроразрушение связано с термоактивированным развитием в образце множества очагов разрушения, элементами которых являются субмикротрещины. Очаги соответствуют областям дефектной структуры материала с достаточно высокой концентрацией напряжений. В силу неоднородного строения твердого тела, эти области различаются по потенциальной опасности породить магистральную трещину, образуя ансамбль с распределением ϕ . Поскольку численность ансамбля N пропорциональна размерам образца, то возникает р.э. Анализ опасности очагов разрушения в нагруженном теле с учетом случайного характера развивающихся их тепловых флуктуаций приводит к возможности двух предельных механизмов разрушения образца и типов р.э.

А. Один из очагов — «опаснейший» — обгоняет развитие других. Этот лидер становится магистральной трещиной, а остальные очаги играют вспомогательную роль.

Б. N очагов находятся в примерно равных «среднеопасных» условиях. Образование магистральной трещины в этом случае связано с их кооперативным взаимодействием и конкурирующим развитием.

Ситуация А является кинетическим аналогом (в предположении о детерминированном характере термоактивированного процесса) известной теории «опаснейшего» дефекта, основанной на механической концепции разрушения, которая связывает магистральную трещину с максимальным в образце концентратором напряжения. Поэтому назовем ее дефектной.

Ситуация Б вероятна лишь в условиях термоактивированного разрушения, при котором случайные «разрушающие» тепловые флуктуации выравнивают опасность очагов и делают возможным их конкурирующее развитие. Назовем такую ситуацию термофлуктуационной.

Выражения для долговечности в двух указанных предельных моделях макроразрушения можно получить модификацией формулы (1), полученной на достаточно крупных образцах, для которых р.э. отсутствует. Характер р.э. определяется зависимостью долговечности от размера образца в единицах N .

При дефектном макроразрушении модификация формулы (1) для долговечности ${}^d\tau(N)$ в этом случае состоит в замене коэффициента γ на его максимальное в образце значение $\gamma_{\max}(N)$:

$${}^d\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_{\max}(N) \sigma}{kT}, \quad (2)$$

где явный вид $\gamma_{\max}(N)$ определяется выбором вида распределения φ и статистикой экстремумов. При φ гауссовом со средним γ и дисперсией β^2 согласно (13)

$$\gamma_{\max}(N) = \gamma + \beta \sqrt{2 \ln N} - \beta \frac{\ln(4\pi \ln N)}{2\sqrt{2 \ln N}}.$$

В термофлуктуационной модели макроразрушения вероятность «разрушающих» энергетических флуктуаций при формировании магистральной трещины увеличивается на энтропийный множитель $\exp(\Delta S/k)$ (14), $\Delta S = \ln \Delta \Gamma$, где их статистический вес $\Delta \Gamma \sim N$, что приводит к среднему значению долговечности

$${}^t\tau \sim \frac{1}{N} \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}. \quad (3)$$

При возрастании N предэкспонента в (3) вырождается в τ_0 (при $N \geq N_0$), ведя к насыщению р.э. и формуле (1).

Р.э. другой характеристики сопротивления образца разрушению (эквивалентной τ , но практически более удобной) — предела прочности σ_τ при $\tau = \text{const}$ — выясняется простым пересчетом выражений для долговечности. Для дефектного и термофлуктуационного случаев соответственно из (2) и (3) имеем:

$${}^d\sigma_\tau = \frac{1}{\gamma_{\max}(N)} \left(U_0 - kT \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right); \quad (4)$$

$${}^t\sigma_\tau = \begin{cases} \sigma_{\tau \min} = \frac{1}{\gamma} \left(U_0 - kT \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right), & N \geq N_0, \\ \sigma_{\tau \min} + \frac{kT}{\gamma} \ln \frac{N_0}{N}, & N < N_0 \end{cases} \quad (5)$$

Из сравнения (2) с (3) видно, что дефектный р.э. долговечности обладает экспоненциальным характером, а термофлуктуационный — предэкспоненциальным. Это приводит к качественным различиям в ряде характеристик р.э. τ и σ_τ при вариации входящих в них величин N , T , γ , U_0 , указанных в сравнительной таблице (табл. 1).

В рамках модели статистической кинетики термоактивированного разрушения (9), учитывающей случайный характер разрушающих тепловых флуктуаций, можно показать, что тип р.э. зависит от величины параметра $\delta \sim \beta \sigma / T$, т. е. является не свойством материала, а его состоянием, определяемым, в частности, условиями испытания образца. При $\delta \rightarrow 0$ реализуется термофлуктуационный р.э., а при $\delta \rightarrow \infty$ дефектный. Однако степень структурной гетерогенности β , приводящей к различию в опасности очагов разрушения, не известна и тип р.э. в конкретном опыте не может быть предсказан.

2. Для выяснения характера р.э., наблюдаемого на опыте, исследовались долговечность τ и предел прочности σ_τ (при $\tau=0,1$ сек.) образцов постоянного сечения при вариации их длины L . На рис. 1–4 представлены некоторые полученные экспериментальные зависимости, типичные для полимеров (капрон, поливиниловый спирт, полиоксиметилен, полипропилен, гидратцеллюлоза) и металлов (медь, олово, вольфрам). На рис. 1 параллельность прямых $\lg \tau(\sigma)$ для образцов разной длины (установленная

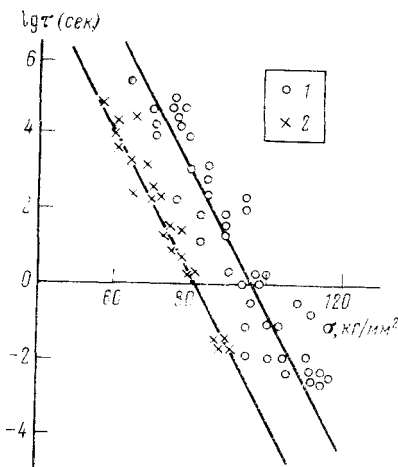


Рис. 1

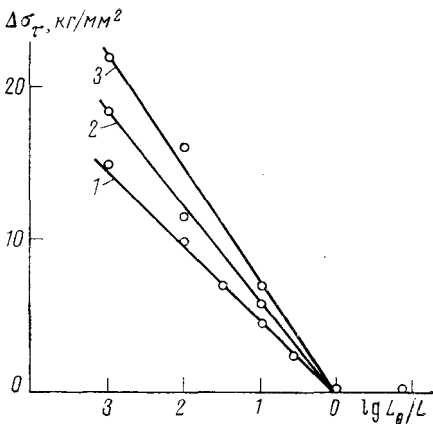


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость $\lg \tau(\sigma)$ при комнатной температуре для волокон капрона диаметром 22 мкм и длиной $L=5$ мм (1), 800 мм (2)

Рис. 2. Приращение предела прочности $\Delta\sigma_\tau=\sigma_\tau-\sigma_{\tau\min}$ капронового волокна как функция относительной длины L_0/L при различных температурах T (°C): 1 – 20; 2 – 100; 3 – 170

по методу наименьших квадратов) свидетельствует о размерной нечувствительности их наклона $\partial \lg \tau / \partial \sigma$. На рис. 2 выяснена температурная зависимость интенсивности р.э. предела прочности $\partial \sigma_\tau / \partial N$. Данные рис. 3 показывают независимость относительно приращения предела прочности

Таблица 1

Сравнительные характеристики размерного эффекта прочности

Характеристика р.э.	Тип размерного эффекта		
	дефектный	термофлуктуационный	опыт
$\frac{\partial \lg \tau}{\partial \sigma} (N)$	Зависит	Не зависит	Не зависит
$\frac{\partial \sigma_\tau}{\partial N} (T)$	Убывает	Растет	Растет
$\frac{\sigma_\tau - \sigma_{\tau\min}}{\sigma_{\tau\min}} = \omega(\gamma)$	Зависит	Не зависит	Не зависит
$\omega(U_0)$	Не зависит	Убывает	Убывает

$\omega=(\sigma_\tau-\sigma_{\tau\min})/\sigma_{\tau\min}$, обусловленного р.э., от величины γ . Зависимость $\omega(U_0)$ установлена на рис. 4. Определяемые из эксперимента $\sigma_{\tau\min}$ и L_0 – соответственно уровень прочности и длина образца, отвечающие практическому исчезновению р.э. Следующие из рис. 1–4 качественные характеристики р.э. сведены в табл. 1.

3. Из приведенной в табл. 1 совокупности данных видно, что на опыте (для указанных выше материалов) наблюдается термофлуктуационный р.э.*

Таким образом, развитие кинетического подхода к выяснению природы р.э. привело к теоретическому предсказанию и экспериментальному обнаружению нового типа р.э.— термофлуктуационного — обусловленного случайным характером энергетических флуктуаций при разрушении образца.

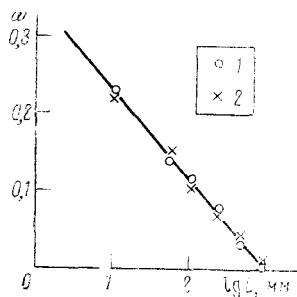


Рис. 3

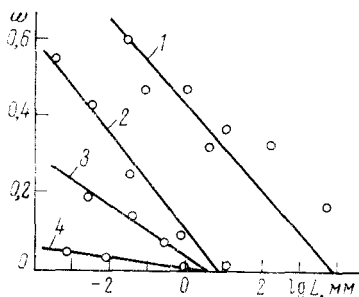


Рис. 4

Рис. 3. Относительное приращение предела прочности $\omega = \Delta\sigma/\sigma_{\min}$ как функция длины L для пленок гидратцеллюлозы с различными значениями γ (отличающимися в два раза), вырезанными параллельно (1) и перпендикулярно (2) оси ориентации исходной пленки

Рис. 4. Зависимость ω от U_0 . В порядке возрастания P_0 : 1 — олово, 2 — полиоксиметилен, 3 — полипропилен, 4 — медь

При таком р.э. малое тело прочнее большого не потому, что в нем встречаются менее опасные дефекты — концентраторы напряжений (их опасность выравнивается случайным характером разрушающих тепловых флуктуаций), а потому, что в нем меньше мест, где возможно развитие очага макроразрушения.

Более полная теория термофлуктуационного р.э. и ее количественное сопоставление с опытом будут приведены в последующих публикациях.

Мы глубоко признательны акад. С. Н. Журкову за постоянный интерес к работе, просмотр рукописи и ценные замечания.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Академии наук СССР
Ленинград

Поступило
10 III 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. И. Александров, С. Н. Журков, Явление хрупкого разрыва, Л., 1933. ² Г. М. Бартенев, А. Н. Бовкуненко, ЖТФ, т. 26, 2508 (1956). ³ W. Frenzel, G. Uhleman, Textiltechnik, № 5, 187 (1954). ⁴ Б. Я. Левин, А. В. Савицкий, Хим. волокна, № 5, 48 (1968). ⁵ Дискуссия о природе масштабного эффекта, Зав. лаб., т. 26, 319; 1104 (1960); т. 27, 318 (1961). ⁶ Б. Б. Чечулин, Масштабный фактор и статистическая природа прочности металлов, М., 1963. ⁷ А. Г. Иванов, В. Н. Минеев, ДАН, т. 220, № 3, 575 (1975). ⁸ Г. П. Черепанов, Механика хрупкого разрушения, М., 1974. ⁹ В. А. Петров, А. Н. Орлов, ФТТ, т. 15, 3371 (1973). ¹⁰ С. Н. Журков, Вестн. АН СССР, № 3, 46 (1968). ¹¹ В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский, Кинетическая природа прочности твердых тел, Л., 1974. ¹² С. Н. Журков, А. И. Слуцкер, Э. С. Куksenko, ФТТ, т. 11, 296 (1966). ¹³ Г. Крамер, Математические методы статистики, М., 1949. ¹⁴ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Статистическая физика, М., 1964.

* Вопрос об условиях опытного проявления термофлуктуационного р.э. и возможности дефектного р.э. требует дополнительного исследования. Можно полагать, что при низких температурах, в условиях так называемого «хрупкого» разрушения, когда ω велико, в материалах, особенно чувствительных к механическим повреждениям, например, таких, как стекла, будет проявляться дефектный тип р.э. Возможно, имеется имена типа р.э., т. е. механизма макроразрушения, и является физическим условием вязкохрупкого перехода.