

Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов

© В.С. Куksenко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: victor.kuksenko@mail.ioffe.ru

На основе кинетических представлений о разрушении твердых тел предложена двухстадийная модель разрушения, инвариантная к масштабу объектов. Развита физическая основа прогнозирования заключительной стадии макроскопического разрушения. Применимость развитых подходов проверена на лабораторных образцах, промышленных конструкциях и крупномасштабных объектах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 02-05-39017 и 04-05-65287) и проекта МНТЦ № 1745.

1. Введение

Кинетическая концепция прочности твердых тел, предложенная С.Н. Журковым не только показала, что разрушение является термоактивационным процессом, но и позволила обосновать принципиальную возможность прогнозирования макроскопического разрушения. Согласно [1,2], долговечность образца τ при одноосном растяжении описывается уравнением

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

где σ — растягивающее механическое напряжение; T — температура образца; U_0 — энергия активации процесса разрушения, близкая по величине энергии сублимации; γ — параметр, характеризующий свойства материала и отражающий локальные механические напряжения; k — коэффициент Больцмана; τ_0 — период межатомных колебаний.

Предсказать момент разрыва образца можно уже из предложенной формулы, если известны начало приложения нагрузки и параметры, входящие в это уравнение. Однако это можно сделать лишь с логарифмической точностью. Во многих реальных ситуациях этого недостаточно. Существенный прогресс в этом направлении был получен при изучении кинетики процесса разрушения на атомном и микроскопическом уровнях, особенно при экспериментальном изучении кинетики накопления и развития начальных субмикроскопических трещин [3–6].

2. Микромеханика разрушения твердых тел

Значительный успех в развитии микромеханики разрушения твердых тел был получен в 60-е годы при изучении образования и развития начальных субмикроскопических трещин методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Согласно [7], по рассеянию рентгеновских лучей на трещинах можно вычислить размеры трещин

и их концентрацию. В работах [3–6] такие исследования проведены на различных материалах: полимерах, металлах и композитных материалах. Оказалось, что размеры начальных микротрещин обусловлены структурой материала, которая как формирует локальные перенапряжения, так и ограничивает их рост на границах гетерогенности. Более интересные результаты получены при изучении кинетики накопления субмикроскопических трещин. Для примера на рис. 1 приведены зависимости накопления субмикроскопических трещин в ориентированной капроновой пленке при различных режимах нагружения. Следует подчеркнуть два наиболее интересных результата. Во-первых, скорость накопления

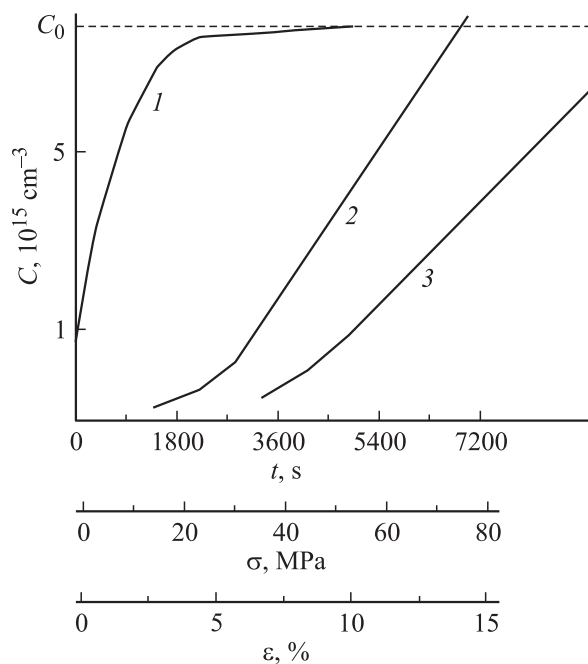


Рис. 1. Накопление субмикротрещин в капроновой пленке при одноосном растяжении: 1 — при действии постоянного напряжения со временем (t, s); 2 — при увеличении растягивающего напряжения (σ, MPa); 3 — при деформировании с постоянной скоростью ($\epsilon, \%$).

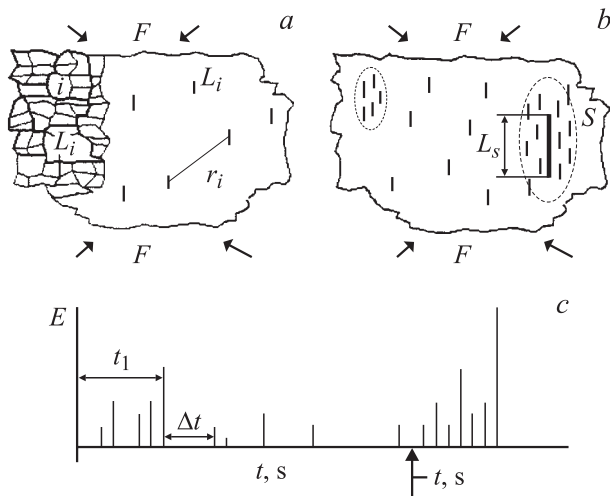


Рис. 2. Две стадии разрушения, стационарная (а), очаговая (b), и схема излучения акустических сигналов при образовании трещин (с); E — энергия излучения, t — время, F — нагрузка, L_i — размер начальных трещин, L_s — размер второго ранга, S — область очага разрушения.

трещин (\dot{C}) описывается выражением, аналогичным по форме уравнению для долговечности (1)

$$\dot{C} = \dot{C}_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma/kT). \quad (2)$$

Это свидетельствует о том, что кинетика накопления микротрещин определяет долговечность нагруженного материала.

Во-вторых, предразрывная концентрация микротрещин не зависит от режима нагружения, а зависит лишь от размеров образующихся микротрещин.

Концентрация микротрещин может достигать достаточно высоких значений, как видно из рис. 1. Это привело к необходимости анализировать большие ансамбли для понимания перехода от микро- к макроразрушению, т.е. использовать статистические закономерности для количественного анализа взаимодействия и развития микротрещин. В результате была сформулирована двухстадийная модель разрушения [5,6], схематически приведенная на рис. 2. На первой стадии (рис. 2, а) происходит делокализованное накопление одиночных стабильных микротрещин в объеме тела, приводящее вследствие флуктуаций концентрации трещин к образованию ансамблей близкорасположенных трещин, способных к взаимодействию и слиянию и в конечном итоге к формированию очага разрушения. Вторая стадия (рис. 2, б) определяется локализованным развитием очага разрушения, заканчивающимся появлением магистральной трещины с разрушением образца. Количественно переход от первой стадии накопления трещин к появлению ансамблей или кластеров проанализирован в [8,9]. Определяющим параметром такого перехода

является концентрационный параметр

$$K = r_i/L,$$

где L — размер образующихся трещин, r_i — средние расстояния между трещинами. Активное образование кластеров начинается при значениях $K \approx 3$.

В работах [3–6] трещинообразование изучалось интегрально, т.е. регистрировалось появление некоторого числа разрывов за выбранный промежуток времени. При этом утрачивается информация об индивидуальности трещин в дискретном характере их генерации. Такого недостатка лишен метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий для каждого акта образования i -ой микротрещины в нагруженном теле указать его время появления t_i и параметры вызванного трещинообразованием акустического сигнала (АС), например амплитуду и длительность, связанные с размером образовавшейся трещины [10,11]. Поток АС при действии постоянной нагрузки схематически представлен на рис. 2, с. На первой стадии делокализованного зарождения микротрещин на временной шкале он близок пуассоновскому потоку. При этом весьма информативными статистическими параметрами оказались временные интервалы (t_i) расстояния (R_i) между хронологически последовательными АС, а также их коэффициенты вариации. Использование АЭ существенно расширило ассортимент исследуемых материалов и, что особенно важно, размеры исследуемых объектов. Приведем эксперимент, не только подтверждающий основные положения двухстадийной

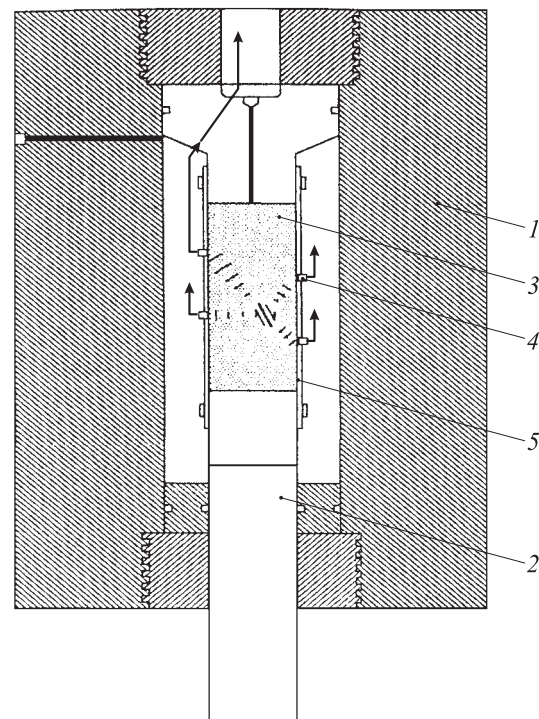


Рис. 3. Схема эксперимента при нагружении образца из гранита (3) в камере высокого давления (1); 2 — нагружающий пистон; 4, 5 — пьезоприемники для прозвучивания образца и регистрации акустических импульсов при образовании трещин.

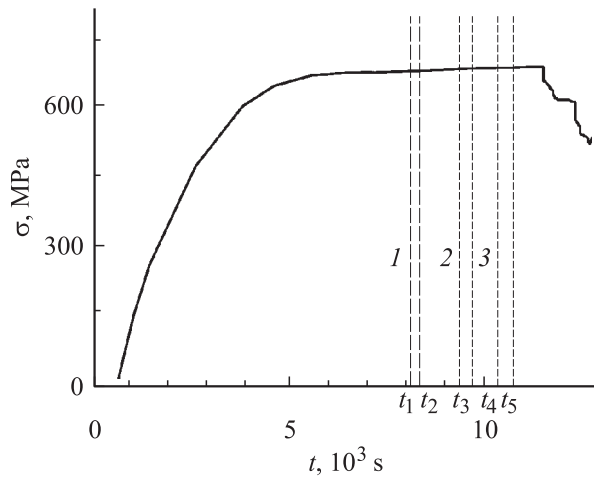


Рис. 4. Диаграмма изменения сжимающего напряжения во времени.

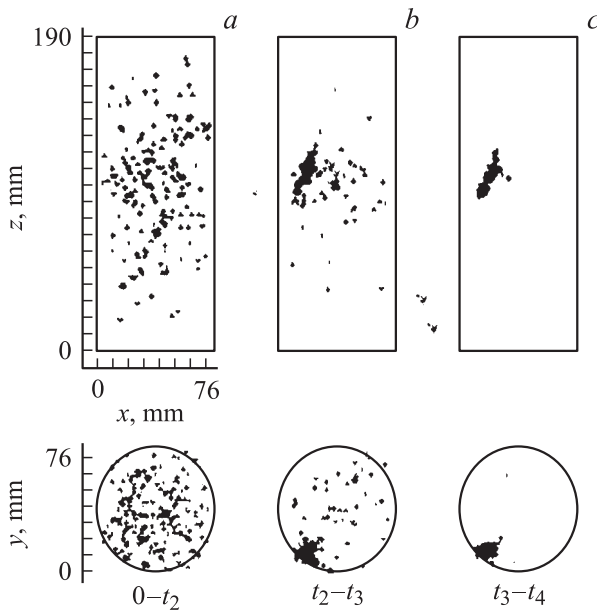


Рис. 5. Распределение микротрещин в образце на первой делокализованной стадии в интервале времени между t_1 и t_2 (a) и при появлении очага разрушения — между t_2 и t_4 (b, c) (рис. 4).

модели разрушения, но и выявляющий важные детали перехода от первой стадии ко второй [12].

На рис. 3 приведена схема эксперимента. Цилиндрический образец мелкозернистого гранита диаметром 75 мм и высотой 190 мм нагружался управляемым прессом одноосносжимающей нагрузкой в камере высокого давления (в данном эксперименте 50 МПа). Образец был покрыт защитной полимерной рубашкой, через которую вмонтированы приемники АС. Кроме того, использовались датчики и приемники для измерения скорости прохождения упругих волн (как для измерения изменений дилатации образца в процессе деформирова-

ния, так и для повышения точности лоцирования мест образования трещин). Для того чтобы детализировать процесс перехода первой стадии во вторую, была разработана система автоматического контроля за режимом нагружения, так чтобы интенсивность АЭ не превышала выбранной величины. В результате одноосносжимающая нагрузка изменялась со временем, как показано на рис. 4. В начале нагружения, т.е. при малых нагрузках, интенсивность АЭ мала и нагрузка увеличивалась с постоянной скоростью. При возрастании АЭ скорость нарастания уменьшалась, и основное время эксперимента образец находился практически при постоянной нагрузке, т.е. в режиме крипа. На заключительной стадии нагрузка уменьшалась в соответствии с сохранением постоянства интенсивности АЭ. В различные интервалы времени можно было анализировать закономерности АЭ.

До времени t_1 (рис. 5, a) картина соответствует первой стадии делокализованного зарождения микротрещин (рис. 2, a). После этого формируется очаг разрушения t_2 , и дальнейшее развитие процесса разрушения определяется его ростом.

3. Физические основы прогнозирования макроразрушения

Как уже отмечалось выше, уравнение Журкова позволяет оценить с логарифмической точностью время до разрушения нагруженного тела, если известны входящие в него параметры. Двухстадийная модель позволяет сформулировать физические принципы прогнозирования макроскопического разрушения и существенно повысить точность оценки момента разрушения. В общей форме долговечность нагруженного тела (τ) можно представить как два временных интервала [13]

$$\tau = t_1 + \Delta t,$$

где t_1 — время накопления стабильных микротрещин, которое занимает основную долю в общей долговечности нагруженного тела. Тогда, если есть возможность контролировать процесс накопления повреждений тем или иным методом и заменить переход из первой стадии во вторую, это и будет предсказание предразрушающего состояния. Второй важный момент заключается в том, что процесс накопления повреждений является процессом стохастическим. Это позволяет использовать целый ряд различных статистических параметров для описания процесса накопления повреждений, которые закономерно должны меняться при переходе из квазистатической делокализованной стадии накопления повреждений в стадию локализованного развития очага разрушения. На рис. 6 приведены ожидаемые изменения некоторых параметров трещинообразования при действии постоянной нагрузки. Кривая накопления дефектов (трещин) 1 на рис. 6, a сначала нарастает, а затем становится пологой (крип). При появлении очага разрушения самоускоренно развивающегося, интенсивность зарождения дефектов

вновь возрастает до окончательного разрушения. Концентрационный критерий K (рис. 6, *b*) соответственно падает, свидетельствуя об уменьшении средних расстояний между дефектами при возрастании их концентрации. Но, если при возрастании концентрации трещин трудно указать критическую ситуацию, для концентрационного параметра можно указать некоторое пороговое значение (штриховая линия), ниже которого идет активная кластеризация дефектов и формирование очага разрушения.

Средние расстояния между дефектами при их хаотическом делокализованном зарождении на первой стадии остаются постоянными и резко уменьшаются при появлении локализованного очага разрушения. Коэффициент вариации соответственно возрастает при появлении очага.

Особенно информативным является параметр, связанный с временными интервалами между хронологически

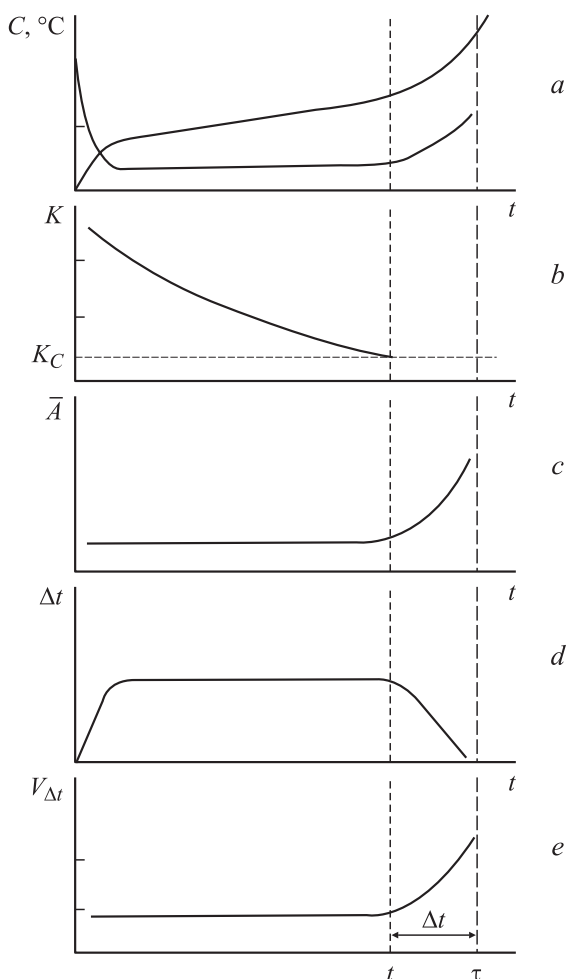


Рис. 6. Схематическое изменение статистических параметров накопления трещин: *a* — накопление трещин (C) и скорость накопления (\dot{C}); *b* — концентрационный параметр K (штриховая линия соответствует пороговому значению K_c); *c* — усредненная амплитуда акустических сигналов \bar{A} ; *d* — средние временные интервалы между хронологически последовательными событиями (Δt); *e* — коэффициент вариации временных интервалов $V_{\Delta t}$.

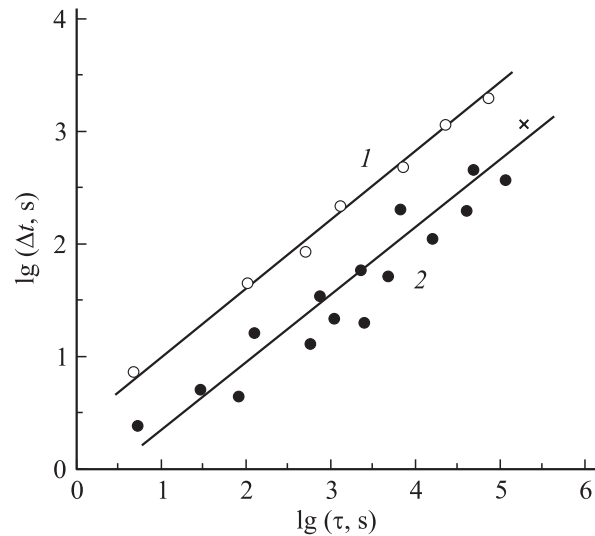


Рис. 7. Связь между временем развития очага разрушения и общей долговечностью нагруженных образцов: 1 — гранитные образцы, 2 — стальные.

последовательными актами образования дефектов. Во-первых, он связан со скоростью зарождения дефектов и может описывать кинетику их накопления [12]. На стационарном участке, где скорость накопления дефектов постоянна, этот параметр также остается постоянным и уменьшается при активном развитии очага разрушения. Особенно важно отметить, что для Пуассоновского потока появления дефектов на первой стадии коэффициент вариации этого параметра равен 1 и должен возрастать, когда нарушается стационарность процесса. Все эти параметры надежно измеряются при использовании АЭ и позволяют успешно выявить переход из стационарной стадии зарождения дефектов в очаговую и предсказать приближение окончательного разрушения.

Следует отметить, что заключительная стадия развития очага разрушения определенным образом связана с общей долговечностью нагруженного тела.

На рис. 7 приведены такие зависимости для стали при испытаниях на растяжение и для образцов из гранита при одноосносжимающей нагрузке. Эти результаты весьма важны для практических решений. После того как выявлен переход в заключительную стадию, можно оценить оставшийся ресурс долговечности и принять необходимые меры.

4. Обсуждение результатов

В настоящей работе изложены в основном физические основы прогнозирования макроскопического разрушения. Они легли в основу развития практического использования этих подходов для диагностики работоспособности различных объектов и прогнозирования их макроскопического разрушения.

Можно отметить, что для лабораторных образцов прогнозирование предразрушающего состояния практически решено. Хорошо изучены не только кинетика накопления микротрещин, но и особенности их образования, в частности триггерный эффект при слабых воздействиях [14]. Что касается крупногабаритных конструкций, подземных сооружений, рудников, очагов землетрясений, имеются определенные трудности, связанные со сложностью объектов, использованием методов регистрации зарождения дефектов и отсутствием предыстории развития процесса разрушения.

Для более надежного диагностирования работающих конструкций был проведен большой цикл работ стендовых испытаний на базах (Котлотурбинный институт, Ижорские заводы, Невский завод). Проводились комплексные испытания на крупногабаритных образцах, элементах конструкций, при сложных напряженных состояниях, приближающихся к реальным объектам. Это обеспечило успешное развитие методов контроля за процессом разрушения на реальных объектах. В настоящее время накоплен богатый опыт диагностики различных работающих объектов газовой и нефтяной промышленности, атомных электростанций и других крупногабаритных объектов.

Для прогнозирования горных ударов в глубоком бокситовом руднике предварительно был проведен анализ микросейсмических событий перед горными ударами и предложен метод прогнозирования горных ударов, который используется уже несколько лет [15]. Конкретный анализ микросейсмичности с позиции двухстадийной модели и концентрационного критерия разрушения предложен в [16].

Прогнозирование землетрясений с этих же позиций также рассмотрено в [17,18]. Для таких сложных объектов, как рудники и очаги землетрясений, прогнозирование может рассматриваться как вероятностное; оно затруднительно в основном из-за малого числа событий, предшествующих горному удару или землетрясению, что затрудняет использование статистических методов анализа, что указывалось выше.

Тем не менее в заключение можно утверждать, что прогнозирование в принципе возможно для различных объектов. И то, что методы прогнозирования базируются на единых физических концепциях кинетической теории прочности и двухстадийной модели разрушения, свидетельствует об их универсальности.

В заключение хотелось бы отметить, что это направление активно поддерживал С.Н. Журков, и работы по этой проблеме публиковались совместно с ним.

Список литературы

- [1] С.Н. Журков. Вестн. АН СССР **11**, 78 (1957).
- [2] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М. (1974). 560 с.

- [3] В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер, А.А. Ястребинский. ФТТ **9**, 2390 (1967).
- [4] С.Н. Журков, В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер. Пробл. прочности **2**, 45 (1971).
- [5] С.Н. Журков, В.С. Куксенко. Механика полимеров **10**, 5, 792 (1974).
- [6] В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Зинатне, Рига (1978). 294 с.
- [7] A. Guaner, A. Fournet. Small-angle scattering of X-rays. London (1955). 503 p.
- [8] С.Н. Журков, В.С. Куксенко и др. Изв. АН СССР. Физика Земли **6**, 11 (1977).
- [9] В.А. Петров. ФТТ **21**, 368 (1979).
- [10] В.С. Куксенко, С.А. Станчиц, Н.Г. Томилин. Механика, композит. материалов **3**, 536 (1983).
- [11] В.С. Куксенко, А.И. Ляшков и др. Дефектоскопия **6**, 53 (1980).
- [12] D.A. Lockner, J.D. Byerly, V.S. Kuskensko, A.V. Ponomarev. Nature **350**, 39 (1991).
- [13] В.С. Куксенко, В.А. Петров. Механика композит. материалов **1**, 31 (1988).
- [14] В.С. Куксенко, Б.Ц. Манжиков, К. Тилигенов, Ж.К. Шатемиров, Б. Э. Эмильбеков. ФТТ **45**, 12, 2182 (2003).
- [15] А.Ю. Гор, В.С. Куксенко, Н.Г. Томилин, Д.И. Фролов. ФТПРПИ **3**, 54 (1989).
- [16] В.С. Куксенко, Б.Ц. Манжиков. ФТТ **47**, в печати (2005).
- [17] А.В. Завьялов. ФТТ **47**, 6, 1000 (2005).
- [18] Н.Г. Томилин, Е.Е. Дамаскинская, П.И. Павлов. ФТТ **47**, 5, 955 (2005).