

СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ГЕТЕРОГЕННОСТЬ – ОСНОВА ФИЗИКИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. Р. РЕГЕЛЬ, А. И. СЛУЦКЕР

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

STRUCTURE-DYNAMIC HETEROGENEITY – THE BASIS OF PHYSICS OF SOLID FRACTURE

V. R. REGEL, A. I. SLUTSKER

The fracture is kinetic phenomenon – process consisting of successive elementary events of scissions of stressed interatomic bonds. These events are occurred under high local stresses arising because of the structure heterogeneity of real solids and are carried out by local fluctuations of thermal energy – due to the dynamic heterogeneity in solids.

Установлено, что механическое разрушение есть кинетическое явление, процесс, состоящий из последовательных элементарных актов – разрывов напряженных межатомных связей. Высокие локальные напряжения (перенапряжения) возникают из-за структурной гетерогенности реальных тел. Разрывы связей осуществляются локальными флуктуациями энергии (динамическая гетерогенность).

journal.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Прочность твердых тел, материалов, то есть устойчивость их при действии механических нагрузок, была и остается важнейшей технической проблемой с давнего времени. Эта проблема еще более обостряется в связи с бурным развитием техники во всем широком диапазоне – от космических систем до микроэлектроники. Таким образом, задачи дальнейшего повышения прочности материалов и обеспечения их надежной работоспособности в условиях действия самых различных температур, вариации скорости нагружения, действия химических и радиационных факторов и т.д. являются крайне актуальными. Успешное решение этих прочностных задач с неизбежностью требует выяснения природы того явления, которое и означает потерю устойчивости тела под нагрузкой, то есть разрушения. Изложение некоторых результатов по физике разрушения твердых тел и составляет содержание данной статьи.

Можно назвать два ключевых факта, оказавших стимулирующее влияние на развитие физики разрушения:

- 1) прочность реальных твердых тел, характеризуемая уровнем разрывного напряжения, является, как правило, низкой по сравнению с так называемой теоретической прочностью;
- 2) значение разрывного напряжения для данного тела не является константой, а изменяется в зависимости от времени действия или скорости изменения нагрузки и температуры.

Раскрытие природы этих свойств прочности и создало основы физики разрушения.

1. ВЫЯСНЕНИЕ ПРИЧИНЫ НИЗКОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ РЕАЛЬНЫХ ТЕЛ

Вторжение физики в науку о прочности, которая до того считалась областью механики, началось в 10-х годах XX в., когда по данным различных физических методов (спектроскопических, акустических, калориметрических) были определены силы межатомного сцепления.

И тогда по этим характеристикам для совершенных (бездефектных) кристаллических решеток была рассчитана прочность на разрыв (Ф. Цвикки, Дж. де Бур, М. Борн и др.), которая и получила название теоретической прочности. Значения теоретической прочности (теоретического предельного разрывного напряжения) оказались в десятки-сотни раз выше значений, измеряемых на практике у реальных тел. Примеры такого сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение теоретической и практической прочности

Материал	σ_r , ГПа (теор.)	σ_r , ГПа (практ.)
Алюминий	7	0,1–0,2
Цинк	10	0,05–0,1
Медь	13	0,2 – 0,3
Никель	21	0,1–0,3

Таким образом, по расчетам, опирающимся на физические данные, природа заложила в твердые тела огромный ресурс прочности. Причиной же низкого значения прочности реальных тел была названа неидеальность их структуры: присутствие различных дефектов, прежде всего микротрещин (А. Гриффитс, 1921 г.). Дефекты приводят к неравномерности загрузки действительно очень прочных межатомных связей. В нагруженных реальных телах возникают локальные перенапряжения, где нагрузка на отдельных межатомных связях может во много раз превышать среднюю по сечению тела (которой и измеряется практическая прочность тел). Там-то под действием теоретической нагрузки и начинается разрушение материала, распространяющееся затем на все сечение.

Эта гипотеза была блестяще подтверждена работами А.Ф. Иоффе (1924 г.), в которых путем ликвидации трещин на поверхности кристаллов каменной соли разрывная прочность была повышена в 400(!) раз и приближена к теоретической. Затем подобные результаты, когда разными способами добивались малой дефектности твердых тел, были получены для многих других объектов. В настоящее время путем формирования достаточно однородных структур уже в промышленности производятся материалы (стали, керамики, стекла, полимеры) с разрывной прочностью только лишь в несколько раз ниже теоретической.

Все эти разработки по повышению прочности реальных тел ведутся в тесной связи с прямыми исследованиями дефектов в твердых телах.

Наличие разнообразных дефектов и их распределение по объему тела можно охарактеризовать общим понятием “структурная гетерогенность”, что подразуме-

вает неоднородность, неравномерность локального расположения атомов в теле по сравнению с идеальной кристаллической решеткой.

Значит, можно считать установленным, что прочность реальных тел тесно связана со структурной гетерогенностью тел, и тогда структурная гетерогенность выступает как важнейший фактор влияния на прочность. Но можно ли считать фактор структурной гетерогенности единственным в определении прочности?

2. ВЫЯСНЕНИЕ ПРИЧИНЫ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ, СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

В обрисованной выше схеме локальных перенапряжений, возникающих на дефектах, условием разрушения тела выступает доведение локальных напряжений до уровня прочности межатомных связей.

В такой схеме нет места влиянию времени действия нагрузки или скорости нагружения, нет места влиянию температуры. Поскольку же такое влияние (и при этом достаточно сильное), как будет показано ниже, наблюдается, то следует заключить, что схема локальных перенапряжений сама по себе не исчерпывает понимания явления разрушения и имеются еще и другие факторы, играющие в разрушении значительную роль.

Приведем примеры экспериментальных данных по влиянию на прочность (на значение разрывного напряжения) времени действия постоянной нагрузки, скорости нагружения и температуры (рис. 1). Из рисунка видно, что влияние времени действия нагрузки τ , скорости нагружения $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$ и температуры T оказывается достаточно сильным – приводит к изменению разрывного напряжения σ_r вплоть до сотен процентов.

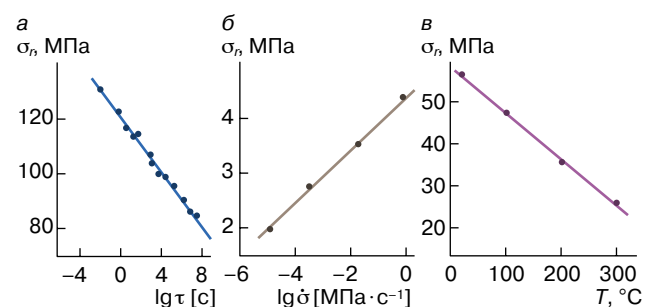


Рис. 1. Зависимости разрывного напряжения σ_r от условий нагружения.

а – влияние времени действия нагрузки τ , платина, 300°С;

б – влияние скорости нагружения $\dot{\sigma}$, бетон, 20°С;

в – влияние температуры, алюминий, $\dot{\sigma} = 5$ МПа/с

Возникает задача объяснения этих эффектов. Попыткам объяснить зависимости σ_r от τ , $\dot{\sigma}$ и T изменениями теоретической прочности связей или уровня локальных перенапряжений трудно дать серьезное физическое обоснование. Поэтому следует обратиться к некоторому дополнительному фактору, выходящему за рамки простой статической схемы действия локальных перенапряжений.

Таким фактором, носящим фундаментальный характер, является внутренняя динамика твердого тела. Действительно, атомы в твердом теле не находятся в покое, а совершают колебания, интенсивность которых возрастает с температурой (начиная с уровня нулевых, квантовых колебаний при $T=0$). Это означает, что действию внешней нагрузки противостоит не статическая конструкция из атомов, а система, находящаяся в своеобразной тряске. Постановка вопроса о возможном влиянии этой тряски на разрушение нагруженного тела представляется уместной.

С целью выяснения этого обратимся прежде всего к анализу наблюдающейся связи прочности σ_r со временем действия нагрузки τ . Отметим, что пока эта связь рассматривалась в форме $\sigma_r(\tau)$ (то есть время τ – аргумент, а σ_r – функция, как представлено на рис. 1, а), то ни обоснованного объяснения, ни просто осмысления связи прочности со временем не находилось.

Прояснение началось тогда, когда была произведена инверсия: связь σ_r и τ стали рассматривать в форме $\tau(\sigma)$ [1]. Время действия нагрузки τ приобрело название “долговечность”, поскольку это время между моментами приложения нагрузки и разрыва образца. А коль скоро долговечность есть время ожидания разрыва тела при действии заданной постоянной нагрузки, то вполне естественно заключить, что с момента приложения нагрузки в теле развивается процесс, доводящий за время τ образец до разрыва.

Таким образом осуществился переход к пониманию разрушения как кинетического явления, а не как критического акта, что было ранее.

Теперь возникла задача выяснения природы и характеристик процесса разрушения. Уже сама констатация этого процесса указывала на необходимое участие внутренней динамики тела в его разрушении (в статической системе просто нет оснований для кинетики). А поскольку одной из важнейших характеристик внутренней динамики является температура, то были поставлены широкие систематические исследования зависимости долговечности от температуры на твердых телах с различными межатомными связями: металлах, ковалентных и ионных кристаллах, полимерах, стеклах и т.д. [1].

Для области, не включающей очень низкие температуры, а также и очень высокие температуры (такие крайние области для тел различной природы являются, разумеется, различными), были получены зависимости $\tau(\sigma, T)$ удивительно единообразные. Примеры подобных зависимостей для некоторых тел различной химической природы в области средних (для каждого типа тел своих средних) температур приведены на рис. 2.

В соответствии с характером графиков на рис. 2 зависимость $\tau(\sigma, T)$ описывается выражением

$$\tau \approx \tau_0 \exp \left[\frac{U(\sigma)}{kT} \right]. \quad (1)$$

Из подобных графиков находят зависимости $U(\sigma)$, примеры которых показаны на рис. 3. Видно, что эти зависимости близки к линейным и могут быть описаны функцией

$$U(\sigma) \approx U_0 - \gamma\sigma. \quad (2)$$

В итоге, объединяя (1) и (2), получаем

$$\tau \approx \tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT} \right). \quad (3)$$

Формула (3) носит признанное название формулы Журкова по имени основоположника кинетических представлений о разрушении академика С.Н. Журкова.

Отметим важные особенности формулы (3):

- фундаментальный характер зависимости долговечности от температуры – в виде фактора Больцмана (в (1) и (3) k – постоянная Больцмана);

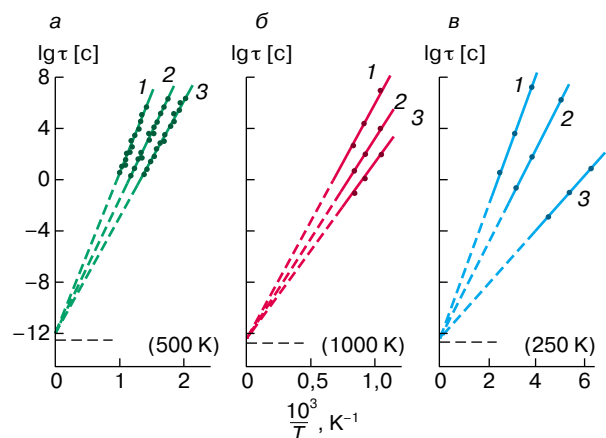


Рис. 2. Температурно-силовые зависимости долговечности (без области низких температур). а – никель, $\sigma = 180$ МПа (1), 250 МПа (2), 320 МПа (3); б – германий, $\sigma = 50$ МПа (1), 100 МПа (2), 150 МПа (3); в – капрон, $\sigma = 60$ МПа (1), 90 МПа (2), 120 МПа (3)

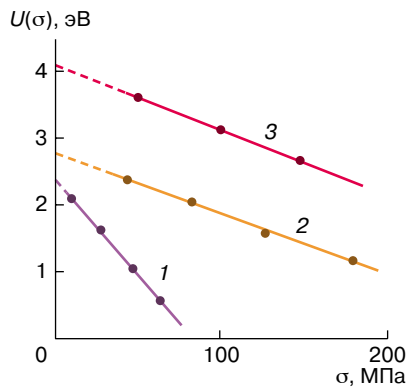


Рис. 3. Снижение энергии диссоциации приложенным напряжением. 1 – алюминий, 2 – серебро, 3 – германий

– общее для всех случаев значение предэкспоненты τ_0 , составляющее $\approx 10^{-12} - 10^{-13}$ с. Это значение лежит в области периода колебаний атомов во всех твердых телах;

– получаемое из экспериментальных данных разное для разных тел значение U_0 оказалось практически совпадающим с энергией диссоциации D межатомных связей для данного тела (табл. 2). Значение U_0 остается постоянным при вариации структурного состояния тела. При такой вариации изменяется только коэффициент γ в (2) и (3).

Отмеченные особенности свидетельствуют о том, что формула (3) является не просто эмпирической зависимостью, а имеет глубокий физический смысл.

Действительно, долговечность τ характеризует темп процесса разрушения. Этот процесс неизбежно состоит из последовательности неких элементарных актов, и общий темп процесса определяется частотой тех актов, которые играют доминирующую роль в данном процессе. В этом случае, когда элементарные акты являются случайными событиями, долговечность тела с логарифмической точностью совпадает со средним временем ожидания элементарных актов [1]. Тогда выражение (3), относящееся к долговечности макроскопического

Таблица 2

Материал	Энергия активации разрушения U_0 , эВ	Энергия диссоциации D , эВ
Платина	5,7	6,0
Каменная соль	3,0	2,7
Кремний	5,1	5,0
Германий	4,1	4,2

образца, является выражением для среднего времени ожидания элементарного акта процесса разрушения.

Как известно, имеет место фундаментальная формула Я.И. Френкеля для среднего времени $\tau_{\text{фл}}$ ожидания флуктуации энергии $E_{\text{фл}}$ на атомах в твердом теле [2]

$$\tau_{\text{фл}} \approx \tau_a \exp\left(\frac{E_{\text{фл}}}{kT}\right), \quad (4)$$

где $\tau_a \approx 10^{-12} - 10^{-13}$ с – период колебаний атомов (период колебаний максимальной частоты в дебаевском спектре).

Совпадение выражений (3) и (4) по виду зависимости от температуры и по значению предэкспоненты ($\tau_0 \approx \tau_a$), а также то обстоятельство, что $U_0 \approx D$ (см. табл. 2), позволяют сделать заключение об элементарных актах разрушения. Эти акты порождаются именно внутренней динамикой в теле. При этом влияние внутренней динамики выступает в форме локальных флуктуаций энергии, возникающих вследствие вибрационной динамики атомов [3]. За счет флуктуаций энергии происходят разрывы межатомных связей, исходная энергия диссоциации которых снижена действием приложенного напряжения ($U(\sigma) \approx U_0 - \gamma\sigma$). Накопление разрывов межатомных связей и составляет основу того процесса, который ведет нагруженное тело к макроразрушению – разрыву.

Флуктуирование локальных значений внутренней энергии может быть охарактеризовано понятием “динамическая гетерогенность”. И тогда вслед за уже отмеченным выше влиянием на прочность структурной гетерогенности еще одним фактором, влияющим на разрушение, выступает тоже гетерогенность, но иной природы – динамическая.

Представления о разрушении как о кинетическом явлении, описываемом формулой для долговечности (3), естественным образом объясняют и количественно описывают показанные выше зависимости разрывной прочности σ_r от скорости нагружения и температуры (см. рис. 1, б, в).

Для этого используем представление о том, что кинетика разрушения заключается в накоплении элементов разрушения.

Дж. Бейли (1939 г.) сформулировал критерий разрыва тела при изменяющемся во времени напряжении $\sigma(t)$ исходя из суммирования парциальных долговечностей (отвечающих мгновенным значениям $\sigma(t)$):

$$\int_0^{t_r} \frac{dt}{\tau[\sigma(t), T]} = 1,$$

где t_r – время до разрыва.

Для простого (но распространенного) случая $\sigma(t) = \dot{\sigma} \cdot t$, где $\dot{\sigma}$ – постоянная скорость нагружения, с учетом того, что разрывное напряжение $\sigma_r = \sigma \cdot t_r$, получаем

$$\sigma_r(\dot{\sigma}, T) \approx \frac{U_0}{\gamma} + \frac{k}{\gamma} \ln\left(\frac{\gamma \dot{\sigma}}{kT} \tau_0\right) \cdot T. \quad (5)$$

Выражение (5) хорошо функционально отражает зависимости σ_r от $\dot{\sigma}$ и T , показанные на рис. 1, б, в. Действительно:

- для условия $T = \text{const}$ из (5) следует линейное нарастание σ_r с $\ln \dot{\sigma}$,

- для условия $\dot{\sigma} = \text{const}$ из (5) следует близкое к линейному спадание σ_r с T (поскольку, как правило,

$$\frac{\gamma \dot{\sigma}}{kT} \tau_0 \ll 1).$$

Более того, выражение (5) вполне удовлетворительно и количественно описывает экспериментальные зависимости $\sigma_r(\dot{\sigma}, T)$ при использовании отвечающих данному материалу значений U_0 и γ [1].

Таким образом, общий подход к анализу физики прочности (или физики разрушения) на основе учета решающего влияния структурно-динамической гетерогенности позволил дать объяснение важным особенностям прочностных свойств материалов. Ключевым здесь выступает признание разрушения как кинетического явления, причем кинетика процесса разрушения управляется внутренней флуктуационной динамикой в твердом теле.

3. НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ РАЗРУШЕНИЯ

3.1. Кинетика разрушения при низких температурах

Выше, как и было отмечено, рассматривалось разрушение, исключая области низких температур. В соответствии с закономерностями термофлуктуационной динамики (выражение (4)) с понижением температуры частота флуктуации энергии атомов, необходимых для разрыва напряженных связей, резко (экспоненциально) падает и кинетика разрушения по термофлуктуационному механизму должна “вымерзнуть” (прекращаться при $T \rightarrow 0$), тогда долговечность под заданной нагрузкой должна была бы возрастать, стремясь к бесконечности при $T \rightarrow 0$. Однако в ряде экспериментов получено, что этого не происходит и долговечность сохраняет конечное измеряемое значение и при низких температурах. Примеры таких результатов показаны на рис. 4. Видно, что термофлуктуационная (экспоненци-

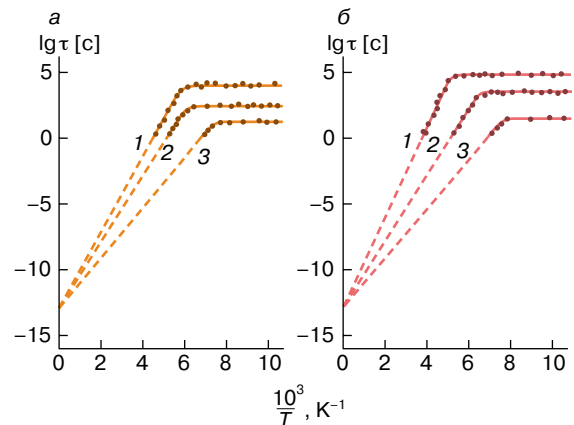


Рис. 4. Температурно-силовые зависимости долговечности в широкой области температуры.

а – тефлон (полимер), $\sigma = 125$ МПа (1), 140 МПа (2), 150 МПа (3);
б – полиэтилен (полимер), $\sigma = 75$ МПа (1), 90 МПа (2), 105 МПа (3)

альная по температуре) зависимость $\tau(T)$ с понижением температуры переходит в атермическую. Измеряемое же конечное значение τ свидетельствует о том, что и при низких температурах кинетика разрушения сохраняется. Но атермичность процесса разрушения указывает на то, что механизм элементарных актов здесь иной, не термофлуктуационный.

Термофлуктуационный механизм заключается в том, что потенциальный барьер, препятствующий, например, разрыву связи, преодолевается за счет флуктуации энергии. То есть имеет место надбарьерный переход с характерной для времени его ожидания экспоненциальной зависимостью от температуры.

Фундаментальные положения квантовой механики допускают иной способ преодоления барьера – подбарьерный переход, носящий название туннелирования. Вероятность (или среднее время ожидания туннельного перехода) от температуры практически не зависит.

Таким образом, опираясь на экспериментальные данные типа рис. 4, есть основания предполагать, что при низких температурах сохранение кинетики разрушения связано с участием квантовой динамики (туннельных переходов) в элементарных актах процесса разрушения. Туннельное захождение является флуктуацией координаты при колебаниях частицы. Интереснейшие вопросы квантово-флуктуационной кинетики разрушения, которые пока фактически только подняты, составляют одно из направлений развития физики разрушения.

3.2. Электронные аспекты механического разрушения

Участие электронной подсистемы твердого тела в определении его прочностных свойств в процессе разрушения тела является очевидным. Действительно, определяющие прочность тела силы межатомного сцепления есть результат взаимодействия электронных оболочек атомов. Нагружение тела вызывает возмущения в электронных оболочках связанных между собой атомов. Разрыв межатомных связей (основа разрушения тела на элементарном уровне) является прерыванием взаимодействия электронных оболочек атомов. Но при всей очевидности роли электронной подсистемы вопросы конкретного включения электронных процессов в рассмотрение механического разрушения только начинают разрабатываться.

Одним из путей выяснения этого вопроса является сопоставление закономерностей механического и электрического разрушения [4]. Электрическим разрушением называют пробой диэлектрика при приложении электрического поля. Оказалось, что и электрическое разрушение имеет кинетическую природу, то есть представляет собой процесс, характеризуемый электрической долговечностью τ_E (временем между моментами приложения электрического поля напряженностью E и наступлением пробоя). Примеры зависимостей $\tau_E(E, T)$ приведены на рис. 5. Видно, что они однотипны с зависимостями $\tau(\sigma, T)$ для механического разрушения (см. рис. 4).

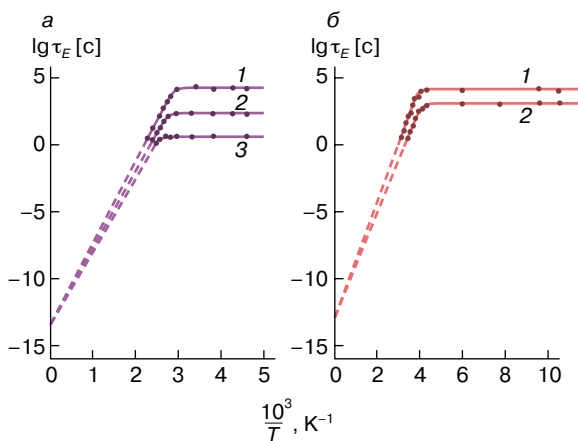


Рис. 5. Зависимость электрической долговечности (времени ожидания пробоя) от температуры и напряженности электрического поля E .
 а – титанат бария (керамика), $E = 9,0$ МВ/м (1), $11,1$ МВ/м (2), $14,2$ МВ/м (3);
 б – полиэтилен (полимер), $E = 500$ МВ/м (1), 525 МВ/м (2)

Данные на рис. 4, б и 5, б относятся к одному и тому же объекту – полиэтилену. Поэтому можно просто сравнивать кинетические характеристики обоих видов разрушения. Оказалось, что начальные барьеры U_0^m и U_0^E практически совпадают ($\approx 1,7$ эВ). Это означает, что контролирующие элементарные акты в обоих процессах являются идентичными. Намечена модель [5], в которой первичным актом для обоих видов разрушения выступает ионизация макромолекул за счет перехода электронов в ловушки. Накопление таких электронов (образование объемного заряда) ведет к пробую. А ионизация молекул резко снижает энергию их диссоциации, что ускоряет разрывы механически напряженных молекул.

Полученные результаты относятся пока к ограниченному кругу диэлектриков (а именно полимеров). Дальнейшее развитие исследований в данном направлении актуально и перспективно.

3.3. Исследование кинетики разрушения прямыми физическими методами

Именно кинетические представления о разрушении стимулировали в последние десятилетия небывалый до этого размах исследования разрушения множеством современных тонких физических методов: спектроскопических, резонансных, дифракционных, эмиссионных, акустических и др. [1]. Использование этих методов ведет к получению прямой информации о конкретных формах и деталях процесса разрушения: локальных перенапряжениях, разрыве межатомных связей и накоплении разрывов, появлении мельчайших зародышевых трещин, укрупнении трещин вплоть до магистральных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установление кинетической природы разрушения привело к представлению о том, что механическая прочность тел является свойством, которое имеет не чисто механическую природу, определяемую только силовым взаимодействием атомов, а кинетическую природу, определяемую закономерностями внутренней атомной динамики в твердых телах. Это положение является общим научным достижением в развитии учения о прочности.

В то же время кинетический прорыв в науке о прочности открыл большие перспективы в решении практических, технических задач. Как феноменологическая информация, так и информация о микроскопике процесса, подводящего нагруженное тело к разрыву, открывают новые пути упрочнения материалов, увеличения их работоспособности, продления их долговечности. Эти же данные позволяют решать важные задачи прогнозирования работоспособности уже

эксплуатируемых систем, выяснения степени истощения их прочностных ресурсов во времени.

Подводя общий итог проведенному рассмотрению состояния проблемы прочности, считаем уместным заключить, что представление о структурно-динамической гетерогенности твердых тел как о важнейшем факторе определения прочности тел обоснованно и плодотворно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реголь В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
2. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 1975. 496 с.
3. Слуцкер А.И., Михайлин А.И., Слуцкер И.А. // Успехи физ. наук. 1994. Т. 164, № 4. С. 357–366.
4. Реголь В.Р., Слуцкер А.И. О кинетике механического и электрического разрушения / К 90-летию С.Н. Журкова. СПб.: Изд-во ФТИ РАН, 1995. С. 14–20.

5. Закревский В.А., Похотин В.А. // Высокомолекул. соединения. 1981. Т. 23 А, № 3. С. 658–667.

Рецензент статьи Б.А. Струков

* * *

Вадим Робертович Реголь, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института кристаллографии РАН. Область научных интересов – физика разрушения твердых тел, дефектная структура кристаллов. Автор более 300 статей и одной монографии.

Александр Ильич Слуцкер, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного технического университета, зав. лабораторией Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. Область научных интересов – физика разрушения твердых тел, структура твердых тел, флуктуационная динамика. Автор более 200 статей и одной монографии.