

05;12

О взаимосвязи пороговых характеристик эрозионного и откольного разрушения

© Ю.В. Петров,¹ В.И. Смирнов²¹ Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия² Петербургский государственный университет путей сообщения,
190031 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vsmirnov1@gmail.com

(Поступило в Редакцию 26 января 2009 г. В окончательной редакции 12 мая 2009 г.)

На основе концепции инкубационного времени разрушения построены пороговые диаграммы эрозионного и откольного разрушения. Показано, что в случае бездефектного материала инкубационное время может оцениваться по результатам данных, взятых из экспериментов по отколу или эрозии. Приведена температурная зависимость пороговых скоростей удара микрочастиц. Для малых размеров микрочастиц получен эффект повышения динамического предела текучести при увеличении температуры поверхности материала-мишени. Обсуждается связь с аналогичным эффектом в экспериментах по откольному разрушению.

При излучении эрозии поверхностей при ударе твердых частиц вполне естественно представляется применение аппарата механики разрушения материалов. Однако использование традиционных квазистатических моделей механики разрушения не позволяет в полной мере объяснить многие наблюдаемые эффекты. Во многих случаях это связано с тем, что классические критерии разрушения не соответствуют специфике эрозионного процесса. Эрозионное разрушение является по своей сути процессом динамическим и поэтому не может быть эффективно проанализировано на основе традиционных статических критериальных соотношений, каким является, например, критерий критического напряжения.

Особенностью эрозионного процесса является то, что поверхность материала подвергается воздействию очень коротких динамических импульсов напряжения. Оценка возможности разрушения в таких условиях может быть проведена только на основе критериев, учитывающих скоростной характер динамического разрыва твердых тел. Эффективным инструментом анализа в таких случаях оказывается структурно-временной критерий, который применительно к рассматриваемой проблеме эрозионного разрушения, как и в случае откольного разрушения, принимает следующий вид [1,2]:

$$\max_t \int_{t-\tau}^t \sigma(s) ds \leq \sigma_c \tau, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ — текущее разрывающее напряжение, σ_c — статическая прочность материала, τ — инкубационное время хрупкого разрушения. Инкубационное время рассматривается как физическая константа материала, характеризующая продолжительность подготовки среды к разрушению или фазовому переходу и определяемая экспериментальным или расчетно-экспериментальным путем.

В [3] приведены различные способы интерпретации инкубационного времени в зависимости от класса решаемых задач. Применительно к рассматриваемым здесь задачам откола и эрозии интерпретация инкубационного времени такова: инкубационное время разрушения τ — это время до разрушения бездефектного материала t_* при нагружении его импульсом напряжения в виде ступенчатой функции Хевисайда $H(t)$ с амплитудой, равной статической прочности материала на растяжение σ_c .

Покажем это с помощью критерия (1). Пусть

$$\sigma(t) = \sigma_c H(t).$$

Подставим это выражение в (1) и определим время до разрушения t_* как промежуток времени от начала воздействия до момента, когда впервые выполняется критериальное равенство (при $\tau \neq 0$)

$$t_* H(t_*) - (t_* - \tau) H(t_* - \tau) = \tau.$$

Очевидно, что $t_* = \tau$.

Применение критерия (1) позволяет исследовать поведение пороговых (предельных) характеристик разрушения — таких как пороговая скорость удара частицы эродента v_* и пороговый силовой импульс удара U_* . Пороговыми здесь называются минимальные внешние воздействия, приводящие к разрушению. В задаче эрозии это — скорость удара, а в задаче откола — амплитуда нагрузки. Такие пороговые (минимальные) нагрузки определяются из экспериментов.

Традиционной задачей при исследовании эрозионного разрушения является определение объема уносимой массы поверхности материала. В экспериментальных исследованиях такой анализ носит, как правило, апостериорный характер. Выяснить механизм поверхностного разрушения материала-мишени можно, лишь проанализировав падение одиночной микрочастицы.

В настоящей работе рассматривается удар по нормали к поверхности упругого полупространства сферической частицы радиуса R . При этом используются соотношения квазистатической теории удара Герца [4]. Разрушение поверхности ассоциируется с образованием кольцевых трещин вдоль контактной площадки. Такие трещины наряду с радиальными встречаются наиболее часто в экспериментах [5].

Определяющим критериальным соотношением является следующее равенство:

$$f(v, R, \tau) = \max_t \int_{t-\tau}^t \sigma_r(v, R, s) ds - \sigma_c \tau, \quad (2)$$

где σ_r — максимальное (радиальное) разрывающее напряжение в точках поверхности, примыкающих к контактной площадке; v — скорость удара; R — радиус частицы.

Инкубационное время разрушения для данного материала можно найти, решив уравнение (2) относительно τ при известной из эксперимента пороговой скорости удара v_* частицы с заданным радиусом R . Результаты таких экспериментов для различных металлов приведены в [6]. Определив таким образом τ , получаем возможность прогнозирования пороговых скоростей удара при произвольных размерах частиц.

На рис. 1 (кривая 1) показана зависимость пороговой скорости эрозионного разрушения (в логарифмических координатах) алюминиевого сплава В95 от диаметра частиц эродента (кружком отмечена экспериментальная точка $v_* = 33$ м/с, $R = 150$ мкм). Эта зависимость характеризуется статической и динамической ветвями. Статический участок (горизонтальный) имеет слабую зависимость пороговой скорости от диаметра частиц эродента. Напротив, динамическая ветвь показывает быстрый (степенной) рост пороговых скоростей с уменьшением их размера. Пунктирная прямая (2) на рис. 1 — результат расчета по традиционному критерию критического напряжения. Инкубационное время разрушения материала в данной задаче — $\tau = 0.71$ мкс. Эта величина

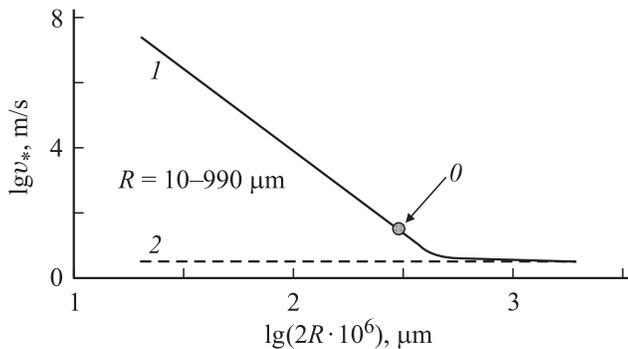


Рис. 1. Зависимость пороговой скорости от радиуса частицы $\tau = 0.71$ мкс: 1 — структурно-временной критерий, 2 — критерий критического напряжения. Точка O: $R = 150$ мкм, $v_* = 33$ м/с, $h_0 = 4.2$ мкм, $t = 0.37$ мкс,

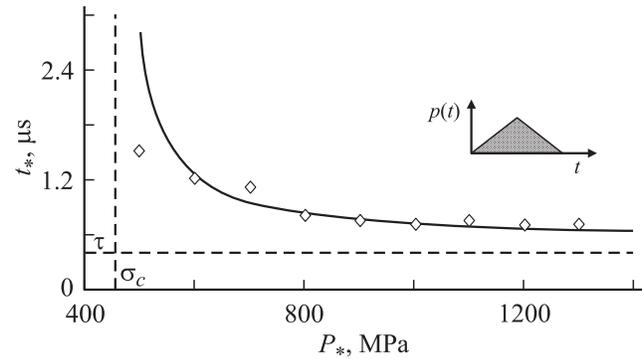


Рис. 2. Временная зависимость прочности в условиях откола: \diamond — эксперимент [7], кривая — теория. $\tau = 0.45$ мкс.

определена на основе экспериментальных данных о пороговых (минимальных) скоростях удара микрочастиц о поверхность образца, полученных в [6], с последующим применением критерия (1).

Для этого же сплава на рис. 2 приведена временная зависимость прочности (соответствие между временем разрушения t_* и пороговой амплитудой нагрузки P_*) в задаче откола. Эта зависимость также характеризуется наличием статической и динамической ветви. Статическая (вертикальная асимптота на рис. 2) и динамическая (горизонтальная асимптота) ветви оказываются соединенными плавным переходом. Как и в задаче эрозии, критерий критического напряжения описывает лишь статическую ветвь. Приведенные на этом же рисунке экспериментальные точки взяты из опытов по откольному разрушению [7]. Инкубационное время разрушения материала, определенное с помощью критерия (1) на основе полученных в [7] экспериментальных данных о пороговых (минимальных) амплитудах нагружения, здесь оказывается равным $\tau = 0.45$ мкс [8].

Таким образом, введение структурного элемента τ , имеющего смысл характерного времени разрушения, дает возможность построить единую кривую временной зависимости прочности в таких, на первый взгляд, разных задачах, как эрозия и откол в твердых телах. Приведенные на рис. 1 и 2 зависимости имеют не только качественное сходство, но они близки по физическому содержанию (статическая и динамическая ветви, промежуточный режим). Кроме того, полученные значения инкубационного времени имеют одно и то же значение ~ 0.6 мкс. Это позволяет предположить, что в случае бездефектного материала инкубационное время может оцениваться по результатам данных, взятых из экспериментов по откольному или эрозионному разрушению. Отметим, что значение инкубационного времени разрушения имеет такой же порядок (около микросекунды), как и длительность нагружения. В таких случаях как раз и проявляются динамические прочностные свойства материалов. При длительности нагружения, значительно большей, чем инкубационное время ($\geq 10 \tau$), поведение

среды определяется ее статическими механическими характеристиками.

В экспериментах по откольному разрушению чистых металлов наблюдается эффект аномально высоких температур — в работах [9,10] было зафиксировано сохранение высоких значений предела текучести в состоянии, когда в условиях растяжения ожидалось плавление материала. В [11] дано объяснение этому явлению с позиций концепции инкубационного времени.

В работе [12] показано, что откол по своим динамическим пороговым характеристикам аналогичен процессу газообразивной энергии, т.е. поверхностного повреждения материала при ударном воздействии микрочастиц. Естественно поэтому ожидать эффекта аномального повышения динамического предела текучести и в случае эрозионного разрушения. Расчеты, выполненные на основе критерия инкубационного времени текучести, подтверждают эту гипотезу.

Исследование поверхности изношенных образцов показывает, что при эрозионном разрушении в области контакта абразивной частицы с материалом-мишенью часто наблюдается вязкий тип разрушения, который проявляется в форме пластических отпечатков [13]. При этом в случае металлов вязкость материала-мишени возрастает с ростом температуры. Во время эрозии хрупких неметаллических материалов также имеют место процессы пластического течения, зависящие от температуры [14].

Оценим критическую (пороговую) скорость удара частиц абразива, при которой возникает пластическое повреждение поверхности, и зависимость этой скорости от температуры испытаний.

Критическую ударную нагрузку, при которой появляются пластические деформации в области контакта, можно оценить по следующему динамическому критерию текучести [15]:

$$\max_t \int_{t-\tau_Y}^t \left(\frac{\sqrt{3}T_k(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds \leq \tau_Y, \quad (3)$$

где α — экспериментально определяемая константа материала, σ_Y — предел текучести при квазистатическом одноосном растяжении, τ_Y — инкубационное время текучести, T_k — интенсивность касательных напряжений (второй инвариант девиатора напряжений). Максимум T_k на поверхности полупространства достигается в точке первоначального контакта, совпадающей с началом цилиндрической системы координат. Как и в случае хрупкого разрушения, рассматривается нормальный удар по упругому полупространству сферической частицы.

Критерий (3) справедлив как для случая одноосного нагружения, так и для случая чистого сдвига. При медленно изменяющейся нагрузке предельный переход $\tau_Y/t_0 \rightarrow 0$, где t_0 — характерная длительность нагружения, позволяет получить соответствующий статический критерий текучести (критерий Мизеса).

Безразмерный параметр α первоначально предложен Дж.Кэмпбеллом [16] и характеризует чувствительность к уровню напряжений, вызывающих необратимую деформацию. В работе [17] показано, что константы α и τ_Y , входящие в критерий (3), существенным образом зависят от температуры. Было установлено, что инкубационное время τ_Y убывает при возрастании температуры и может быть представлено следующей зависимостью:

$$\tau_Y(T) = 3.18 \cdot 10^{-7} \exp(3500/T), \quad (4)$$

а влияние температуры на величину α описывается равенством

$$\alpha(T) = 1.88 + 2.83 \cdot 10^3/T. \quad (5)$$

В вышеприведенных соотношениях T — абсолютная температура. Эти соотношения получены в результате применения критерия (3) к экспериментальным данным, полученным в [18]. В указанной работе приведены значения предела текучести сталей при скорости деформации от 10^{-3} до 10^5 l/s в широком диапазоне температур. При изменении температуры от 293 до 913 К величина τ_Y меняется, согласно (4), от 0.05 до $1.5 \cdot 10^{-5}$ s, а параметр α в соответствии с (5) — от 11.5 до 5.

Инкубационное время текучести материала τ_Y характеризует скорость протекания определенных процессов в структуре материала. Поскольку переход в пластическое состояние связан с развитием дислокационной структуры, логично предположить, что эта величина связана с временными характеристиками движения дислокаций, а именно: значение τ_Y обратно пропорционально скорости движения дислокаций v . Для последней можно взять зависимость, предложенную Дж. Гилманом [18]:

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right),$$

где ΔG — свободная энергия активации, k — постоянная Больцмана. Отсюда получим соотношение для инкубационного времени в следующем виде [17]:

$$\tau_Y = \gamma \exp\left(\frac{\Delta G}{kT}\right).$$

Последнее соотношение может служить теоретическим обоснованием эмпирической зависимости (4).

Пластическое течение материала начинается при достижении равенства в (3), а критическая скорость удара частицы определяется как корень этого уравнения при заданных значениях R и τ_Y .

На рис. 3 показана зависимость пороговой скорости вязкого разрушения поверхности теплоустойчивой стали 15Х2МФА от радиуса сферических микрочастиц при температуре 293, 573 и 913 К. Механические свойства стали, принятые в расчете [19]: предел текучести $\sigma_Y = 550$ МПа, модуль упругости $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. Как видно из рисунка,

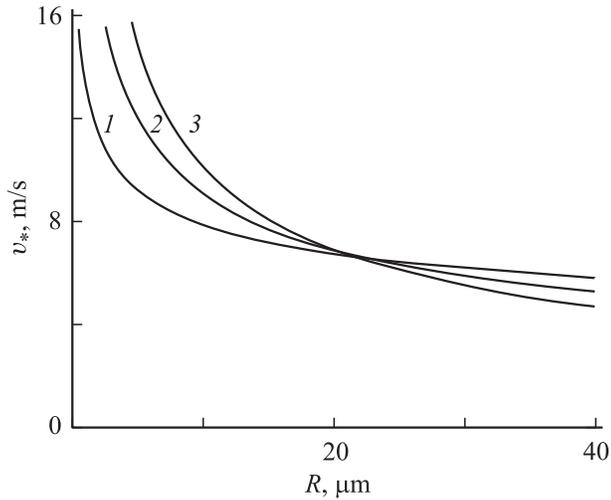


Рис. 3. Пороговые значения скорости эрозионного разрушения для стали 15X2MFA: 1 — $T = 293$, 2 — 573 , 3 — 913 К.

с уменьшением размеров частиц и увеличением температуры наблюдается повышение пороговой скорости. Точке пересечения кривых соответствуют координаты $R \approx 20 \mu\text{m}$, $v_* \approx 7 \text{ m/s}$.

Такое поведение пороговой скорости удара означает, что при нагреве материала происходит охрупчивание его поверхности. В [20] этот эффект связывается с образованием толстого окисного слоя на поверхности преграды при повышении температуры образца-мишени. Предполагается, что такой окисный слой понижает эрозию для частиц малого размера.

Противоположный вывод был сделан в [21]: испытания показали, что окисление не повлияло на весовые потери образца, обусловленные эрозией. Кроме того, отмечалось, что в большинстве случаев с увеличением температуры эрозионные потери уменьшались. Эта тенденция представляется авторам [21] несколько неожиданной, так как при нагреве поверхности предел текучести образца и энергия, необходимая для удаления материала, „несомненно уменьшаются“.

Графики (рис. 3) свидетельствуют об обратном: уменьшение размера частиц и нагрев образца приводят к росту пороговых значений скорости удара, при которых начинается пластическое течение, что означает соответствующее увеличение динамического предела текучести. Как было отмечено выше, такой эффект наблюдался в экспериментах по отколу в чистом алюминии и титане: при аномально высоких температурах, близких к температуре плавления, сохранялась высокая прочность, в то время как ожидалось плавление материала [9,10]. В [11] данный эффект объясняется конкуренцией двух процессов — разрушения и плавления, каждый из которых характеризуется своим инкубационным временем.

В условиях высокотемпературной эрозии, как видно, также сохраняется принципиальная возможность указан-

ного явления, что подтверждает взаимосвязь процессов откольного и эрозионного разрушения твердых тел.

Отметим, что полученные значения пороговых скоростей удара примерно соответствуют порядку скоростей, наблюдаемых в эксперименте: так, для стали AISI 310 при $T = 300$ К получено [6]: $v_* = 19.53 \text{ m/s}$ при $R = 2.5 \mu\text{m}$, и $v_* = 15.16 \text{ m/s}$ при $R = 75 \mu\text{m}$. Более точные оценки пороговых скоростей удара в настоящее время получить затруднительно, в силу того что формулы (1) и (2) для определения параметров τ_γ и α являются весьма приближенными и требуют уточнения по мере накопления экспериментальных данных.

Еще одним примером взаимосвязи откольного и эрозионного разрушения является поведение порогового силового импульса U_* в зависимости от длительности нагружения t_0 . Применительно к процессу эрозии это наглядно проявляется в случае удара цилиндрической частицы торцом по нормали к поверхности упругого полупространства. Для такой формы частицы выражение для пороговой скорости удара можно получить в аналитическом виде [22]

$$v_* = \begin{cases} \frac{3\sigma_c \tau}{4(1-2\nu)\rho R \sin \frac{\pi t_0}{2\tau}}; & t_0 \geq \tau, \\ \frac{3\sigma_c \tau}{4(1-2\nu)\rho R}; & t_0 \leq \tau, \end{cases} \quad (6)$$

где продолжительность удара (контакта) определяется по формуле

$$t_0 = \pi R \sqrt{\frac{2(1-\nu^2)\pi\rho}{3E}}, \quad (7)$$

в которой ρ — плотность частиц эродента, а ν и E — коэффициент Пуассона и модуль упругости материала мишени.

В выражении (6) верхняя строка представляет статическую ветвь, а нижняя — динамическую. Действительно, так как

$$\lim_{\frac{R}{c\tau} \rightarrow \infty} \frac{R}{c\tau} \sin\left(C_0 \frac{c\tau}{R}\right) = C_0,$$

где $C_0 = \text{const}$, то $v_* \rightarrow \text{const}$ при $R/(c\tau) \rightarrow \infty$, а именно

$$v_*(R) \Big|_{\frac{R}{c\tau} \rightarrow \infty} = \frac{\sigma_c}{1-2\nu} \sqrt{\frac{3\pi(1-\nu^2)}{2\rho E}}.$$

Здесь c — скорость упругих волн.

„Статическое“ значение пороговой скорости в данном случае легко получить также из критерия критического напряжения

$$\max_t \sigma_r(t) = \sigma_c,$$

где

$$\sigma_r(t) = \frac{1-2\nu}{2} \frac{\sqrt{km}}{\pi R^2} v \sin\left(\frac{\pi t}{t_0}\right),$$

m — масса частицы, $k = 2RE/(1-\nu^2)$. Однако классический критерий прочности, как и в случае сферической

частицы, не дает возможности анализировать эффекты эрозионного разрушения, так как пороговая скорость оказывается не зависящей от размера частиц.

Из выражения (6) видно, что, умножив пороговую скорость разрушения v_* на плотность ρ и радиус цилиндрической частицы R , можно получить величину порогового силового импульса разрушения U_* :

$$U_*(t_0) = \frac{1}{1-2\nu} \begin{cases} \frac{\sigma_c \tau}{\sin \frac{\pi \tau}{2t_0}} & \text{при } t_0 \geq \tau; \\ \sigma_s \tau & \text{при } t_0 \leq \tau. \end{cases} \quad (8)$$

В уравнении (8) верхняя строка отвечает статической ветви пороговой диаграммы разрушения, а нижняя — динамической, причем последняя при $\nu = 0$ имеет смысл „кванта“ разрушения [23], т.е. минимально возможного силового импульса.

Выражение для порогового силового импульса, аналогичное (8), имеет место и в случае откола. Для нагрузки симметричного треугольного профиля продолжительностью $2t_0$ величина U_* определяется по формуле [8]

$$U_*(t_0) = \begin{cases} \frac{3\sigma_c t_0^2}{3t_0 - \tau} & \text{при } t_0 \geq \frac{2}{3} \tau; \\ \frac{4}{3} \sigma_c \tau & \text{при } t_0 \leq \frac{2}{3} \tau. \end{cases} \quad (9)$$

Как и в (8), верхняя строка в (9) представляет статическую ветвь, а нижняя — динамическую.

Для сплава В95 на рис. 4 приведены зависимости порогового силового импульса от длительности нагружения $U_* = U_*(T)$, построенные по формулам (8) и (9). При этом в случае эрозии принято $T = t_0$, а в случае откола — $T = 2t_0$.

Приведенные примеры показывают, что эффекты откольного и эрозионного разрушения твердых тел имеют общую природу, связанную со спецификой разрушения материалов при кратковременных импульсных нагрузках. Важнейшим следствием этой взаимосвязи является возможность извлечения из экспериментов по отколу и эрозии критериальных параметров, необходимых для

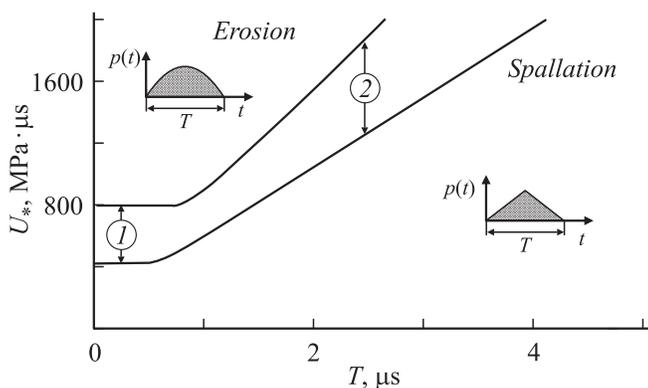


Рис. 4. Пороговый силовой импульс разрушения: 1 — динамическая ветвь, 2 — статическая ветвь.

прогнозирования динамических прочностных свойств материалов.

В заключение заметим, что понятие „пороговости“ не противоречит представлениям о кинетической природе разрушения. В работе [24] критерий инкубационного времени разрушения рассматривается с учетом кинетической концентрации Журкова, что позволяет получить зависимость инкубационного времени от температуры и обнаружить связь между инкубационным временем и периодом тепловых колебаний атомов. Учет термофлуктуационного характера разрушения в сочетании с понятием инкубационного времени приводит к более точному определению разрушающих нагрузок при динамических воздействиях. Кинетика разрушения, основанная на критерии Бейли [25], не дает возможности обобщить кинетическую концепцию на случай импульсного нагружения. При использовании критерия инкубационного времени разрушения удастся описать весь диапазон значений длительности нагружения — как статические, так и динамические испытания. Укажем также на работу [26], в которой предлагается способ изучения динамического разрушения, основанный на описании состояния разрушаемого образца специфическим уравнением континуальной механики, эквивалентным критерию инкубационного времени разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 07-08-00527-а, 08-01-00646а, 08-01-12009-офи).

Список литературы

- [1] Петров Ю.В., Уткин А.А. // Физико-химическая механика материалов. 1989. Т. 25. № 2. С. 38–42.
- [2] Petrov Y.V., Morozov N.F., Smirnov V.I. // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2003. Vol. 26. N 4. P. 363–372.
- [3] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 132 с.
- [4] Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 219 с.
- [5] Зернин М.В., Морозов Е.М. // Механика контактных взаимодействий. М.: Физматлит, 2001. С. 624–639.
- [6] Урбанович Л.И., Крамченков Е.М. // Исследования по упругости и пластичности. Вып. 18. СПб: Изд-во СПбГУ, 1999. С. 263–265.
- [7] Златин Н.А., Пугачев Г.С., Мочалов С.М., Брагов А.М. // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 9. С. 2599–2602.
- [8] Смирнов В.И. // Прикл. механика и технич. физика. 2006. Т. 47. № 5. С. 97–106.
- [9] Канель Г.И., Разоренов С.В. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 5. С. 839–845.
- [10] Канель Г.И., Разоренов С.В., Зарецкий Е.Б., Херрман Б., Майер Л. // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 4. С. 625–629.
- [11] Петров Ю.В., Ситникова Е.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 8. С. 71–75.
- [12] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1996. № 3. С. 72–75.
- [13] Эрозия / Под ред. К. Присс. М.: Мир, 1982. 464 с.

- [14] *Hockey B.J., Wiederhorn S.M., Johnson H.* Fracture mechanics of ceramics. Vol. 3. Flaws and testing. NY: Plenum Press, 1978. 506 p.
- [15] *Груздков А.А., Петров Ю.В., Смирнов В.И.* // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 11. С. 1987–1989.
- [16] *Campbell J.D.* // Acta Metall. 1953. Vol. 1. N 6. P. 64–80.
- [17] *Груздков А.А., Петров Ю.В.* // Докл. РАН. 1999. Т. 364. № 6. С. 766–768.
- [18] *Meyers M.A.* Dynamic Behavior of Materials. NY, 1994. Ch. 13. P. 323–381.
- [19] *Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб: Политехника, 1993. 391 с.
- [20] *Young J.P., Ruff A.W.* // J. of Basic Engineering. 1977. Vol. 99. N 2. P. 25–30.
- [21] *Smeltzer C.E., Gulden M.E., Compton W.A.* // J. of Basic Engineering. 1970. Vol. 92. N 3. P. 255–238.
- [22] *Смирнов В.И.* // Проблемы прочности. 2007. № 1. С. 69–78.
- [23] *Петров Ю.В.* // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66–68.
- [24] *Глебовский П.А., Петров Ю.В.* // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 6. С. 1021–1024.
- [25] *Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [26] *Капитанов А.В., Петров Ю.В.* // Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород. М.: Физматлит, 2006. С. 296–304.