

УДК 539.4

ВЗАИМОСВЯЗЬ СКОРОСТИ ТРЕЩИНЫ, ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛА

А. М. Брагов, А. Ю. Константинов, А. В. Кузнецов*,
А. К. Ломунов, Г. Г. Савенков*,**

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

* Машиностроительный завод "Армалит", 198097 Санкт-Петербург, Россия

** Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013 Санкт-Петербург, Россия

E-mails: bragov@mech.unn.ru, constantinov.al@yandex.ru,
avkuznecov@armalit1.ru, lomunov@mech.unn.ru, sav-georgij@yandex.ru

Представлены результаты экспериментального исследования скорости распространения трещин и динамической трещиностойкости стали марки Ст.45 и дюралюминия марки Д16Т с помощью модифицированного метода Кольского на разрезном стержне Гопкинсона. Приведены результаты микрофрактографического анализа образцов и определена фрактальная размерность. С использованием полученных значений фрактальной размерности вычислены критические коэффициенты интенсивности напряжений.

Ключевые слова: скорость трещины, фрактальная размерность, динамическая трещиностойкость.

DOI: 10.15372/PMTF20180116

Введение. Динамическое разрушение твердых тел является процессом, который сложно описать аналитически и численно. Это обусловлено тем, что для решения уравнений динамической механики разрушения необходимы экспериментально определяемые параметры материала, в частности значения скорости распространения трещины и динамического критического коэффициента интенсивности напряжений (ККИН), который определяется на стадиях начала движения трещины (K_{Id}), ее распространения (K_{ID}) и остановки (K_{Ia}) и является характеристикой трещиностойкости материала. Полагается, что между скоростью трещины и трещиностойкостью существует функциональная взаимосвязь [1].

Остается открытым вопрос, какое влияние оказывает увеличение скорости нагружения (и (или) деформации) на трещиностойкость материала. На основе результатов работ Н. Н. Давиденкова [2], посвященных исследованию ударного нагружения металлов, сделан вывод об их охрупчивании при увеличении скорости и уменьшении температуры испыта-

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (грант № 9.6109.2017/6.7).

ний. Однако охрупчивание зависит также от химического и фазового составов материала и его структуры [3].

В качестве характеристики ККИН выбирается минимальное (K_{Im}) значение среди значений коэффициентов K_{Id} , K_{ID} , K_{Ia} . Уменьшение интенсивности напряжений до значений, меньших K_{Im} , вызывает остановку трещины [4]. Характеристики трещиностойкости и скорость трещин также необходимы для расчета максимально допустимого размера дефекта, при котором не происходит катастрофического разрушения в условиях действия на конструкцию или ее элемент динамических нагрузок. Поскольку многие современные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию интенсивных динамических нагрузок, корректное определение указанных выше характеристик динамической трещиностойкости и скорости трещины является важной проблемой динамической механики разрушения. Кроме того, следует отметить, что имеющиеся в литературе данные о скоростях трещин получены либо для стали, либо для хрупких материалов (керамики, горных пород и т. п.).

Известен ряд методов, позволяющих определять как характеристики трещиностойкости, так и скорости трещин V [1, 5, 6]. В работе [1] для этих параметров приводится функциональная зависимость

$$K_{ID} = f(V)K_{IC}, \quad (1)$$

где $f(V) = (1 - V/C_R)/(1 - 0,95V/C_2)^{1/2}$; C_R — скорость волны Рэлея; C_2 — скорость поперечных звуковых волн; K_{IC} — критический коэффициент интенсивности напряжений, определенный в квазистатических условиях нагружения. Также в [1] соотношение (1) обобщено на случай фрактальных (или самоаффинных) трещин:

$$K_{ID}^f = K_{IC} \frac{1 - a_0^{\nu/D_f}}{(1 - 0,884a_0^{\nu/D_f})^{0,5}} a^{-0,5\nu}. \quad (2)$$

Здесь $a_0 = 0,3bC_1/(\Lambda C_R)$; b — параметр кристаллической решетки материала; C_1 — скорость продольных звуковых волн; Λ — длина свободного пробега фононов (размер области флуктуации плотности, размер дилатона [7]); $\nu = D_f - 1$ — нецелая часть фрактальной размерности контура трещины D_f ; a — масштаб измерения длины трещины [8]. Обобщение (2) обусловлено негладкостью (шероховатостью) берегов трещины. Значения a_0 для чистых металлов приведены в [9] и верны также для сплавов на их основе.

В работе [1] экспериментальная проверка (2) отсутствовала, в то же время отмечалось, что для подтверждения данного соотношения необходимо провести корректные (с высоким разрешением по времени) эксперименты по определению K_{ID} (желательно для металлов и сплавов, для которых известны все стандартные механические характеристики), скорости трещин и фрактальной размерности их контуров на испытанных образцах.

В данной работе с использованием модификации метода Кольского определяются динамическая трещиностойкость и скорость трещин на разрезном стержне Гопкинсона (РСГ) для двух материалов: нормализованной стали марки Ст.45 и естественно состаренного алюминиевого сплава Д16Т. Проведены сравнение квазистатических и динамических значений трещиностойкости и проверка соотношений (1), (2).

Параметры материалов. Методика определения скорости трещин, динамической трещиностойкости и фрактальной размерности. Стандартные механические характеристики и критические коэффициенты интенсивности напряжений испытанных материалов, определенные по методике, изложенной в [10], приведены в табл. 1.

Следует отметить, что при динамических испытаниях деформационные (пластические) характеристики дюралюминия были практически такими же, как и при статических испытаниях, в то время как для стали марки Ст.45 существенно уменьшились значения

Таблица 1

Механические характеристики материалов

Материал	σ_{02} , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	K_{IC} , МПа·м ^{0,5}
Ст.45	350 (610)	600 (950)	13,5 (23,0)	42,5 (22,5)	49 ± 4
Д16Т	300 (360)	420 (640)	14,0 (13,0)	12,0 (12,0)	43 ± 6

Примечание. В скобках указаны динамические характеристики, определенные при скорости деформации $\dot{\epsilon} \approx 1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ на РСГ.

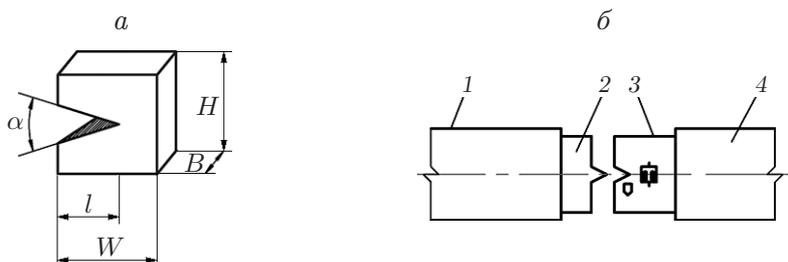


Рис. 1. Образец (а) и схема испытаний по определению динамической трещиностойкости (б):

1 — нагружающий стержень, 2 — клин, 3 — образец, 4 — опорный стержень

относительного сужения, став приблизительно равными значениям относительного удлинения.

Для определения динамической трещиностойкости K_{Id} по началу движения (старту) трещины также использовался метод РСГ, модифицированная версия которого предложена в работе [11]. Отличие методики испытания на трещиностойкость [11] от традиционного метода РСГ заключается в том, что испытания проводятся при наличии клина на конце нагружающего стержня и с использованием специальных компактных образцов (рис. 1).

Регистрируя отраженный от образца $\epsilon^R(t)$ и прошедший через него $\epsilon^T(t)$ импульсы деформации, можно вычислить соответственно перемещение клина и суммарную силу как функции времени:

$$\delta(t) = -2C \int_0^t \epsilon^R(t) dt, \quad P(t) = EA\epsilon^T(t).$$

Здесь C — скорость звука в мерных стержнях; E , A — модуль Юнга и площадь поперечного сечения мерных стержней соответственно.

Если определена критическая точка t_c на луче $\epsilon^T(t)$, то критическая сила может быть вычислена по формуле

$$P_c(t_c) = EA\epsilon^T(t_c),$$

где индекс “с” соответствует критическому состоянию, когда начинает распространяться трещина.

Соотношение между критической сжимающей силой P_c и растягивающим усилием Q описывается выражением

$$Q = P_c / [2 \operatorname{tg}(\alpha/2 + \beta)],$$

где α — угол клина, рад; $\beta = \operatorname{arctg} \mu$ — угол трения; μ — статический коэффициент трения.

Так как длина ударника в 10 раз больше общей длины клина и образца, то за счет многократного отражения нагружающего импульса деформации в образце процесс его нагружения можно считать квазистатическим. В этом случае для вычисления динамического коэффициента интенсивности напряжений можно использовать соотношение [5, 11]

$$K_{Id} = \frac{Q}{B\sqrt{W}} f = \frac{EA\varepsilon^T(t_c)}{2B\sqrt{W} \operatorname{tg}(\alpha/2 + \operatorname{arctg} \mu)} f, \quad (3)$$

где Q — критическая сила; B — толщина образца; W — ширина образца (см. рис. 1, а). Функция $f = F(l/W)$ (l — длина острого надреза) — функция податливости, или упругой деформации, рассчитанная методом конечных элементов и описываемая уравнением

$$f = 4,11 - 1,83 \left(\frac{l}{W}\right)^{1/2} + 21,13 \left(\frac{l}{W}\right)^{3/2} + 11,44 \left(\frac{l}{W}\right)^{5/2} + 18,61 \left(\frac{l}{W}\right)^{7/2}.$$

При испытаниях образцов с малыми размерами разрушение может происходить в течение небольшого промежутка времени (в данном случае — в течение $20 \div 30$ мкс).

В экспериментах по определению динамической трещиностойкости момент начала движения трещины t_c (и соответствующая ему критическая сила, по которой можно вычислить коэффициент интенсивности напряжений) обычно определяется по характерной точке на кривой импульса $\varepsilon^T(t)$. Как правило, эта точка является либо максимумом, либо точкой перегиба на возрастающем участке кривой прошедшего через образец импульса сжатия $\varepsilon^T(t)$.

Время t_c можно определить более точно, регистрируя сигналы с тензодатчиков, наклеенных непосредственно на образец. Выбор места расположения тензодатчиков на образце относительно вершины трещины является сложной задачей. В результате экспериментов, проведенных при различных ориентации и положении датчиков, установлено, что наиболее эффективно момент начала движения трещины определяется в том случае, если тензодатчик наклеен на образец сбоку на небольшом расстоянии ($1 \div 2$ мм) от вершины трещины. В момент начала движения трещины от ее берегов начинает распространяться волна разгрузки, что приводит к резкому уменьшению амплитуды регистрируемого датчиком импульса деформации. Запись сигнала с тензодатчика, наклеенного непосредственно на образец, позволяет более точно определить разрушающую (критическую) нагрузку.

Методика получения характеристик трещиностойкости [12], используемая в настоящей работе, незначительно отличается от методик, предложенных в [11, 13]. Основное отличие используемой в данной работе модификации методики [11] состоит в том, что для измерения скорости распространения трещины на компактный образец в зоне предполагаемого движения трещины наклеивается специальный тензодатчик. Датчик представляет собой набор отдельных решеток с базой 1 мм, изготовленных на одной подложке, расстояние между решетками составляет 1,7 мм. Все решетки датчика соединяются параллельно и запитываются от стандартного блока питания. При распространении трещины решетки последовательно разрываются, что вызывает значительное изменение общего сопротивления датчика и соответственно скачки на осциллограммах. Это позволяет с высокой точностью определять скорость распространения трещины.

После динамического разрушения образцов из полученных фрагментов изготавливались металлографические шлифы, на которых при различных увеличениях (50, 100, 200 или 50, 100, 500) проводился замер длины контура разрушения (контура трещины). Замер выполнялся вручную следующим образом: в соответствии с меткой на исходном изображении выбирается масштаб измерения и с помощью циркуля измеряется длина ломаного контура трещины. Затем проводится измерение длины контура при другом значении масштаба на другом изображении профиля с другой меткой. Процедура измерения проводится

Таблица 2

Динамическая трещиностойкость, скорость трещин и фрактальная размерность

Материал	\dot{K}_I , МПа · м ^{0,5} · с ⁻¹	K_{Id} , МПа · м ^{0,5}	K_{ID} , МПа · м ^{0,5}		V , м/с	D_f
			Расчет по соотношению (1)	Расчет по соотношению (2)		
Ст.45	$1,1 \cdot 10^6$	$27,5 \pm 7,5$	$47,9 \pm 3,9$	$43,5 \pm 2,5$	115 ± 10	1,12
Д16Т	$0,6 \cdot 10^6$	$15,0 \pm 5,0$	$41,5 \pm 5,8$	$35,0 \pm 2,7$	170 ± 10	1,09

a

б

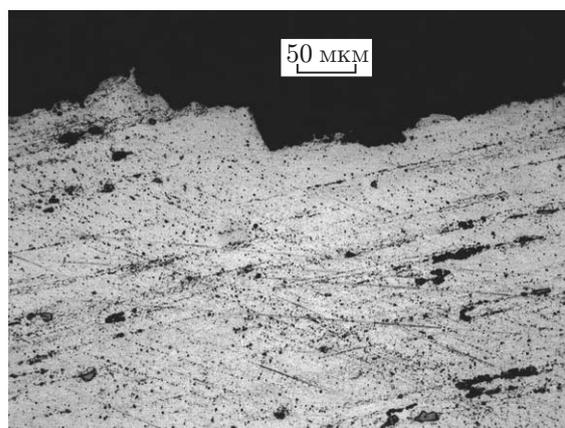
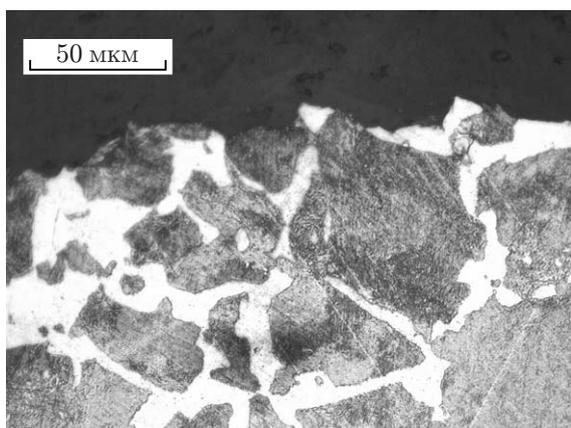


Рис. 2. Микроструктура образцов в зоне излома:
a — Ст.45, *б* — Д16Т

при трех различных масштабах, после чего строится зависимость $L = F(L_n)$ (L_n — длина трещины при выбранном масштабе измерения) и по тангенсу угла наклона в логарифмических координатах определяется фрактальная размерность D_f .

Результаты испытаний и их обсуждение. Предварительно для пар трения сталь — сталь и сталь — дюралюминий на тангензиометре ОТ-1 [14] определялись коэффициенты трения μ . Для стали марки Ст.45 $\mu = 0,16$, для дюралюминия $\mu = 0,15$.

Результаты испытаний по определению динамической трещиностойкости, скорости трещин и фрактальной размерности приведены в табл. 2. Микроструктура образцов показана на рис. 2, фрактограммы поверхности трещин — на рис. 3. На рис. 4 приведены контуры поверхности разрушения, используемые для определения их длин.

Микрофрактографический и металлографический анализ разрушенных образцов показал, что на поверхностях разрушения четко видны три зоны разрушения (см. рис. 3), соответствующие описываемым в [1] зонам динамического разрушения материалов. Появление первой зоны, по-видимому, обусловлено наличием трещины, которая образуется при изготовлении концентратора.

В первой и второй зонах, примыкающих к концентратору, разрушение происходит в результате сдвиговой деформации, в третьей зоне разрушение происходит либо вдоль границ ферритоперлитной структуры (для стали марки Ст.45), либо вдоль границ слоев скоплений интерметаллидных частиц (для сплава Д16Т).

Значения динамических критических коэффициентов интенсивностей напряжения, рассчитанные по формуле (3) без учета фрактальности поверхности трещин, для обоих материалов существенно меньше статических значений (для Д16Т K_{Id} практически в три раза меньше статического значения) (см. табл. 2).

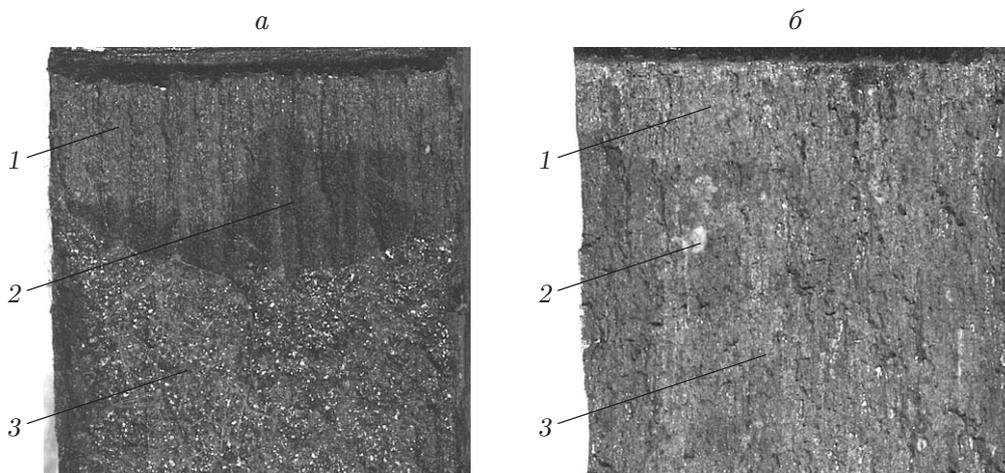


Рис. 3. Фрактограммы образцов в зоне излома:

a — Ст.45, *б* — Д16Т; 1 — зона разрушения, обусловленного наличием трещины, образующейся при изготовлении концентратора, 2 — зона начала движения основной трещины, 3 — зона долома образца

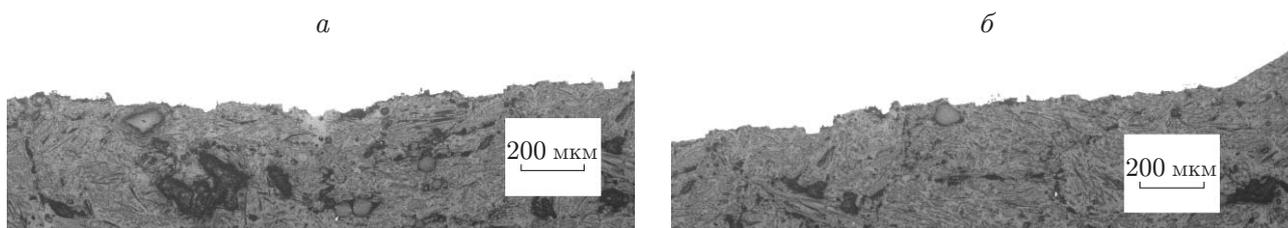


Рис. 4. Контуры поверхностей разрушения образцов в зоне излома:

a — Ст.45, *б* — Д16Т

Относительная скорость нагружения, вычисленная по соотношению $\zeta = \dot{K}_{Id}/K_{Id} = 1/t_f$, где t_f — время до разрушения, определяемое по диаграмме нагружения, в обоих случаях равна $\zeta = 4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и является предельной в соответствии с квазистатическим критерием [13]. Небольшая скорость нагружения является существенным недостатком данной методики.

Значения динамических ККИН, вычисленные по соотношению (1) с учетом значений K_{IC} , приведенных в табл. 1, и скоростей трещин, приведенных в табл. 2, указаны в четвертой графе табл. 2.

Значения K_{ID} , рассчитанные по соотношению (2) при масштабе измерения $a = 200 \text{ мкм}$ (масштаб выбран с учетом масштаба, указанного на рис. 4, остальные необходимые для расчета данные взяты из работы [9] и табл. 2), приведены в пятой графе табл. 2. Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что полученные расчетные значения динамической трещиностойкости K_{ID} больше значений K_{Id} (трещиностойкость на начальной стадии движения трещины). Однако при учете фрактального характера контура трещины значения K_{ID} и K_{Id} различаются несущественно.

Проведем сравнение полученных результатов с данными, приведенными в работе [15]. В [15] также использовался нагружающий стержень Кольского, но вместо ударника применялся заряд взрывчатого вещества, вследствие чего скорости нагружения были на три порядка больше, чем в настоящей работе. Исследовались образцы из стали двух марок: SAE 4340 (отечественный аналог — сталь марки 40Х2Н2МА) и холоднокатаная 1020 (оте-

чественный аналог — сталь марки Ст.20). Сталь марки SAE 4340 была подвергнута термообработке до достижения предела текучести, приблизительно равного 1,45 ГПа, т. е. можно полагать, что сталь данной марки находилась в квазихрупком состоянии и характеризовалась очень слабой зависимостью характеристик прочности и пластичности от скорости нагружения. Сталь марки холоднокатаная 1020 имела предел текучести, приблизительно равный 645 МПа, и обладала высокой пластичностью, ее характеристики прочности и пластичности существенно зависели от скорости нагружения.

Для стали марки SAE 4340 получены результаты, свидетельствующие о том, что значения статического ККИН K_{IC} и динамического ККИН K_{ID} практически совпадают, т. е. параметры разрушения не зависят от скорости нагружения.

Для холоднокатаной стали марки 1020, имеющей характеристики, близкие к характеристикам стали марки Ст.45, результаты испытаний которой приведены в настоящей работе, экспериментальное значение статического ККИН K_{IC} получить не удалось (вероятно, вследствие высокой пластичности). Однако при вычислении значения K_{IC} с учетом наличия пластической зоны было получено так называемое эквивалентное значение ККИН K_{IC}^e . Экспериментальное значение динамического ККИН K_{ID}^e оказалось практически в два раза меньше статического значения, что согласуется с результатами, полученными для образцов из стали марки Ст.45.

Заключение. Из полученных результатов расчетно-экспериментальных исследований следует, что, зная значения K_{IC} и D_f , определенные в каких-либо независимых экспериментах по ударному разрушению образцов, можно оценить динамическую трещиностойкость K_{ID} материала на стадии распространения трещины.

В то же время, зная динамическую трещиностойкость K_{ID} и фрактальную размерность контура поверхности разрушения, с использованием приведенного в [1] соотношения

$$K_{ID} = K_{IC} \frac{1 - V/C_R}{(1 - 0,95V/C_2)^{0,5}} a^{0,5(1-D_f)}$$

можно оценить скорость трещин в материале при тех же скоростях нагружения, при которых была определена динамическая трещиностойкость.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы. Значения K_{ID} , вычисленные по соотношению (2), близки к значениям K_{ID} , определенным экспериментально на клиновидных образцах с помощью методики разрезного стержня Гопкинсона. Увеличение скорости нагружения (деформации) в общем случае приводит к охрупчиванию испытанных материалов (Ст.45, Д16Т) и соответственно к уменьшению их трещиностойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савенков Г. Г., Барахтин Б. К., Рудометкин К. А., Лебедева Н. В. Динамическая трещиностойкость металлических материалов в условиях быстрого распространения самоподобной трещины // Журн. техн. физики. 2014. Т. 84, вып. 7. С. 52–57.
2. Давиденков Н. Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов. Киев: Наук. думка, 1981.
3. Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Жегина И. Л., Герчикова Н. С. Влияние скорости деформирования и понижения температуры на трещиностойкость металлических материалов // Физ.-хим. механика материалов. 1985. № 6. С. 26–31.
4. Степанов Г. В., Маковой В. А. Динамическая трещиностойкость сталей при квазистатическом нагружении / АН УССР. Ин-т пробл. прочности. Препр. Киев, 1988.
5. Степанов Г. В. Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов / Г. В. Степанов, В. А. Маковой. Киев: Наук. думка, 1993.

6. **Партон В. З.** Динамика хрупкого разрушения / В. З. Партон, В. Г. Борисковский. М.: Машиностроение, 1988.
7. **Журков С. Н.** Дилатонный механизм прочности твердых тел // Физика прочности и пластичности. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1986. С. 5–11.
8. **Федер Е.** Фракталы. М.: Мир, 1991.
9. **Морозов В. А., Савенков Г. Г.** Предельная скорость распространения трещин в динамически разрушаемых материалах // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 1. С. 163–169.
10. **Савенков Г. Г., Барахтин Б. К., Брагов А. М., Шукина Е. В.** Влияние угла раскрытия надреза на механические свойства и морфологию излома образцов из малоуглеродистой стали при различных скоростях деформации // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 4. С. 182–190.
11. **Клепачко Дж.** Обсуждение нового экспериментального метода определения начала роста трещин при больших скоростях нагружения с помощью волн напряжения // Теорет. основы инж. расчетов. 1982. Т. 104, № 1. С. 33–40.
12. **Брагов А. М., Ломунов А. К.** Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов // Прикл. пробл. прочности и пластичности. 1995. Вып. 51. С. 127–137.
13. **Еременко А. С., Новиков С. А., Сеницын В. А. и др.** Определение трещиностойкости и энергии разрушения хрупких материалов при ударном расклинивании // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 4. С. 149–159.
14. **Крагельский И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбатов. М.: Машиностроение, 1977.
15. **Костин Л., Даффи Дж., Фройнд Л.** Инициирование разрушения в металлах при нагружении волнами напряжений // Механика разрушения. Быстрое разрушение. Остановка трещин. М.: Мир, 1981. С. 151–171.

*Поступила в редакцию 19/IV 2016 г.,
в окончательном варианте — 9/XII 2016 г.*
