

УДК 539.4

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА НА ОТКОЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

В. И. Смирнов, Ю. В. Петров*

Петербургский государственный университет путей сообщения,
198103 Санкт-Петербург, Россия

* Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург, Россия
E-mails: vsmirnov1@gmail.com, yp@YP1004.spb.edu

Анализируется влияние временной формы импульса нагрузки на откольную прочность материалов. В рамках классической одномерной схемы рассмотрены импульсы треугольной формы с участками нарастания и затухания сигнала и без участка его нарастания. Приведены результаты расчета пороговых характеристик разрушения для рельсовой стали. Показана возможность оптимизации разрушения путем подбора длительности нагружения с использованием введенной характеристики динамической прочности — импульсной емкости разрушения. При проведении исследования используется структурно-временной критерий разрушения.

Ключевые слова: откол, инкубационное время, структурно-временной критерий, пороговый силовой импульс, импульсная емкость разрушения.

DOI: 10.15372/PMTF20180213

Введение. В экспериментах по разрушению “бездефектных” образцов обнаружена зависимость динамической прочности от скорости и длительности нагружения даже для материалов, поведение которых близко к идеальному упругохрупкому. Этот результат подтверждается известной временной зависимостью прочности, впервые полученной и исследованной для металлов в работах [1, 2]. В опытах с образцами из алюминия и меди установлена зависимость времени действия растягивающих напряжений в сечении откола от их амплитуды. Проведено сравнение этих данных с соответствующими временными зависимостями прочности, полученными при квазистатических условиях. Оказалось, что сравниваемые зависимости существенно различаются, причем положение динамического участка временной зависимости прочности практически не зависит от исходной статической прочности материала.

Силовой импульс будем считать пороговым, если он имеет минимальную амплитуду, при которой происходит разрушение, при этом саму амплитуду также будем называть пороговой. Для длинных импульсов с крутым фронтом нарастания сигнала время до разрушения равно $t_* \approx T/2$, пороговая амплитуда $P_* \approx \sigma_c$ (T — длительность импульса; σ_c — статическая прочность материала). При $T \rightarrow 0$ $t_* \approx \text{const}$. Зависимость между временем до разрушения t_* и пороговой амплитудой P_* называется временной зависимостью

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00638-а).

прочности. Таким образом, динамическая прочность не является постоянной материала, но зависит от времени до разрушения (времени “жизни” образца).

Согласно данным динамических испытаний высокоскоростное откольное разрушение материалов кратковременными пороговыми импульсами происходит при напряжениях, во много раз превышающих статический предел прочности. При этом динамический участок диаграммы характеризуется слабой зависимостью времени до разрушения от пороговой амплитуды начального импульса (динамическая ветвь временной зависимости прочности).

Разрушение образца может происходить по истечении некоторого промежутка времени после достижения максимума растягивающего напряжения в сечении откола. При задержке разрушения импульсы, как правило, являются близкими к пороговым. В таких случаях обычно считается, что прочность зависит от времени действия растягивающих напряжений в сечении откола. Задержку откольного разрушения, а также увеличение прочности (критического напряжения разрыва) материалов с ростом скорости нагружения можно объяснить, введя понятие инкубационного времени [3]. При этом утверждается, что возникновению разрыва на определенном масштабном уровне предшествует процесс развития дефектов в структуре материала. Этот подготовительный (инкубационный) процесс оценивается некоторым характерным для данного материала промежутком времени τ . Иными словами, разрушение в сечении откола не определяется мгновенными значениями растягивающих напряжений $\sigma(t)$, а зависит от амплитудных и временных характеристик локального силового поля. Для материалов, в которых макроскопические дефекты отсутствуют, критерий инкубационного времени записывается в виде [4]

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

где τ — инкубационное (структурное) время разрушения.

Таким образом, структурно-временной подход для сред без макроскопических дефектов основан на двух характеристиках материала: статической прочности материала σ_c и инкубационном времени разрушения τ . Указанные величины образуют систему определяющих параметров процесса разрушения. На рис. 1 приведена временная зависимость прочности алюминиевого сплава В95, построенная с помощью критерия (1). Экспериментальные точки взяты из работы [2].

Из экспериментальных данных следует, что наиболее существенное влияние на откольную прочность оказывают два фактора: зависимость формы волны нагружающего напряжения от времени и амплитуда нагрузки. Критерий (1) позволяет аналитически оценить влияние указанных факторов на динамическую прочность при отколе.

Рассмотрим импульсную нагрузку треугольной формы с участками нарастания и убывания сигнала одинаковой длительности t_0 и только с участком затухания сигнала длительностью t_0 . В расчетах длительность действия импульса в обоих случаях принята одинаковой и равной T , причем в первом случае $T = 2t_0$, а во втором $T = t_0$.

1. Импульс треугольной формы с участками нарастания и затухания. С использованием одномерной модельной схемы откола [5, 6] рассмотрим отражение импульса сжимающего напряжения треугольной формы с участками нарастания и затухания одинаковой длительности t_0 от свободного конца полубесконечного стержня. Ось Ox направлена вдоль стержня, который располагается справа от начала координат ($x > 0$). Выражение для напряжения в падающем импульсе записывается в следующей форме:

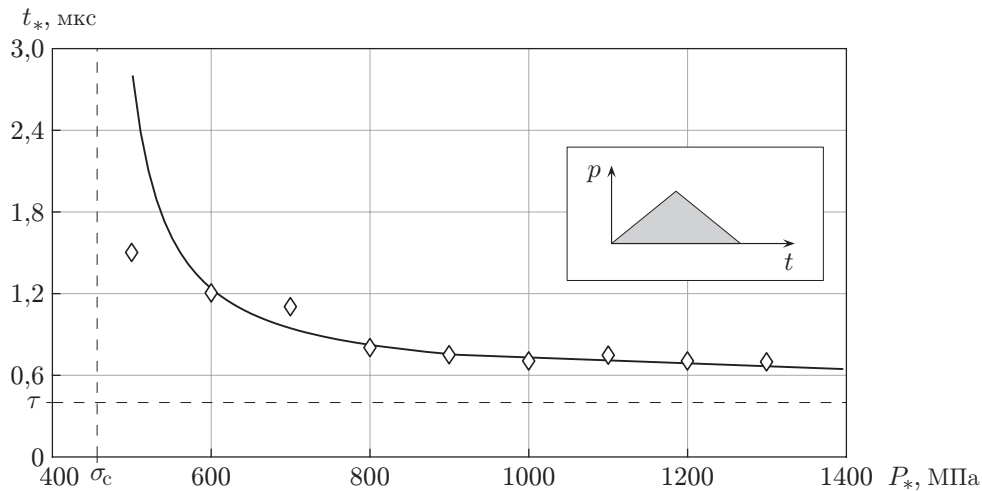


Рис. 1. Временная зависимость прочности алюминиевого сплава В95 и форма импульса

$$\sigma_-(x, t) = -P \left[\frac{ct + x}{ct_0} [H(ct + x) - H(ct + x - ct_0)] + \left(2 - \frac{ct + x}{ct_0} \right) [H(ct + x - ct_0) - H(ct + x - 2ct_0)] \right].$$

Здесь P — амплитуда импульса; c — скорость звука в материале; $2t_0$ — длительность импульса; $H(t)$ — функция Хевисайда. Уравнение, описывающее профиль отраженной от свободного конца стержня волны напряжения, имеет вид

$$\sigma_+(x, t) = P \left[\frac{ct - x}{ct_0} [H(ct - x) - H(ct - x - ct_0)] + \left(2 - \frac{ct - x}{ct_0} \right) [H(ct - x - ct_0) - H(ct - x - 2ct_0)] \right].$$

Суммарное напряжение равно $\sigma(x, t) = \sigma_-(x, t) + \sigma_+(x, t)$.

Максимум растягивающего напряжения впервые возникает в точке с координатой $x_0 = ct_0/2$. Определим время до разрушения t_* в этом сечении в зависимости от пороговой амплитуды P_* . Из критериального соотношения (1) находим [7]

$$\frac{t_*}{\tau} = \begin{cases} \frac{1}{2(1 - \sigma_c/P_*)} + \frac{2}{3}, & 1 \leq \frac{P_*}{\sigma_c} \leq 2, \\ \frac{4\sigma_c}{3P_*} + 1, & \frac{P_*}{\sigma_c} \geq 2. \end{cases} \quad (2)$$

Полученная зависимость (2) между временем разрушения t_* и пороговой амплитудой P_* представляет собой временную зависимость прочности. Первое выражение в (2) соответствует статической ветви диаграммы этой зависимости, нижняя — динамической ветви. Заметим, что в случае эрозионного разрушения эта зависимость также характеризуется наличием статической и динамической ветвей [8].

Временная зависимость прочности не позволяет эффективно оценивать динамические свойства различных материалов: один из материалов может иметь большую пороговую амплитуду P_* по сравнению с другим материалом, но малое время до разрушения t_* , и наоборот (оба параметра P_* и t_* являются функциями длительности действия импульса T).

На практике целесообразно использовать зависимость некоторой интегральной прочностной характеристики от независимой (управляемой в эксперименте) переменной — длительности нагружения T . В частности, такой характеристикой может служить величина порогового силового импульса U_* . Для заданной формы временного профиля (равнобедренный треугольник $T = 2t_0$) эта величина составляет $U_*(t_0) = P_*t_0$. Найдем значение пороговой амплитуды P_* в зависимости от времени увеличения (уменьшения) нагрузки t_0 :

$$P_*(t_0) = \begin{cases} \frac{\sigma_c}{1 - \tau/(3t_0)}, & t_0 \geq \frac{2}{3}\tau, \\ \frac{4\sigma_c}{3t_0}\tau, & t_0 \leq \frac{2}{3}\tau. \end{cases}$$

Тогда выражение для порогового импульса разрушения имеет вид

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

Первое выражение в (3) соответствует статической ветви диаграммы временной зависимости прочности, второе — динамической ветви.

2. Импульс треугольной формы без участка нарастания амплитуды. Пусть импульс напряжения длительности t_0 имеет форму треугольника без участка нарастания амплитуды:

$$\begin{aligned} \sigma_-(x, t) &= -P \left(1 - \frac{ct + x}{ct_0}\right) [H(ct + x) - H(ct + x - ct_0)], \\ \sigma_+(x, t) &= P \left(1 - \frac{ct - x}{ct_0}\right) [H(ct - x) - H(ct - x - ct_0)], \\ \sigma(x, t) &= \sigma_-(x, t) + \sigma_+(x, t). \end{aligned}$$

Выражение для временной зависимости прочности имеет вид [3]

$$\frac{t_*}{\tau} = \begin{cases} \frac{1}{4(1 - \sigma_c/P_*)} + 1, & 1 \leq \frac{P_*}{\sigma_c} \leq 2, \\ \frac{\sigma_c}{P_*} + 1, & \frac{P_*}{\sigma_c} \geq 2. \end{cases} \quad (4)$$

Пороговая амплитуда P_* равна

$$P_*(t_0) = \begin{cases} \frac{\sigma_c}{1 - \tau/(2t_0)}, & t_0 \geq \tau, \\ \frac{2\sigma_c}{t_0}\tau, & t_0 \leq \tau. \end{cases}$$

В случае нагружения импульсом напряжения в виде треугольника без участка нарастания сигнала выражение для силового порогового импульса разрушения имеет вид

$$U_*(t_0) = \begin{cases} \frac{\sigma_c t_0^2}{2t_0 - \tau}, & t_0 \geq \tau, \\ \sigma_c \tau, & t_0 \leq \tau. \end{cases} \quad (5)$$

Первое выражение в (4), (5) соответствует статической ветви диаграммы временной зависимости прочности, второе — динамической ветви.

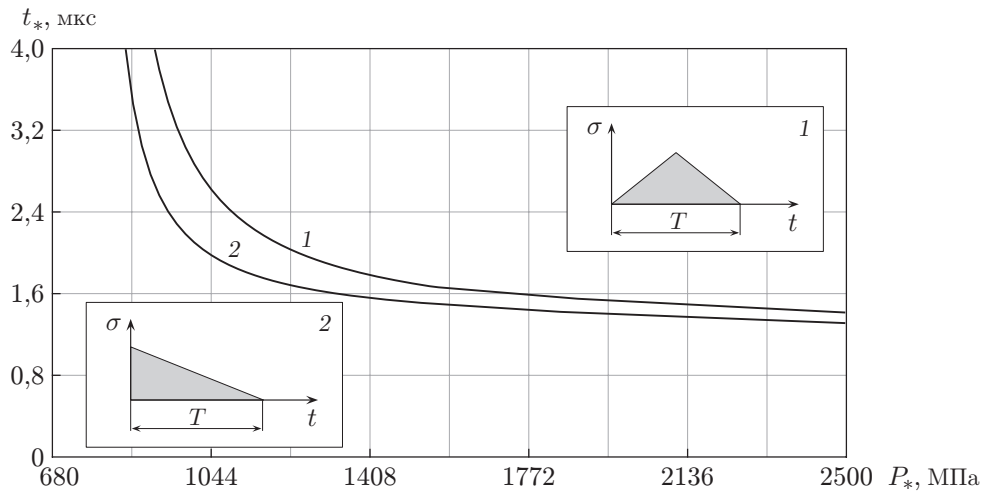


Рис. 2. Временная зависимость прочности рельсовой стали марки Ст.700 при различных формах импульса напряжения:

1 — импульс треугольной формы с участками нарастания и затухания, 2 — импульс треугольной формы без участка нарастания

3. Сравнение пороговых характеристик. На рис. 2 показана временная зависимость прочности рельсовой стали марки Ст.700 (МСЖД60) (предел прочности $\sigma_c = 777$ МПа, вязкость разрушения $K_{Ic} = 70$ МПа \cdot м^{1/2}, инкубационное время $\tau = 1$ мкс [7]) для импульсов треугольной формы с участком нарастания сигнала (кривая 1) и без участка нарастания (кривая 2). Видно, что в случае треугольного профиля без участка нарастания время до разрушения t_* меньше, чем в случае симметричного треугольного профиля. Это уменьшение не превышает 25 %. По мере уменьшения длительности действия нагрузки различие постепенно уменьшается, стремясь в пределе к нулю, т. е. $t_* \rightarrow \tau$ при $t_0 \rightarrow 0$ для любой зависимости внешнего воздействия от времени. Следовательно, инкубационное время τ является инвариантной характеристикой, зависящей лишь от прочностных свойств материала.

На рис. 3 приведена зависимость порогового силового импульса разрушения от длительности нагружения $U_*(T)$ для стали марки Ст.700. Штриховыми линиями показаны зависимости $U_*(T)$, полученные в соответствии с критерием критического напряжения $\sigma \leq \sigma_c$, пунктирной — зависимость $U_*(T)$, полученная в соответствии с критерием Шемякина — Никифоровского [5]

$$\int_0^{t_*} \sigma(t) dt \leq J_*,$$

где t_* — время до разрушения; J_* — критическое значение силового импульса, определяемое в эксперименте.

Очевидно, что критерий критического напряжения не описывает процесс разрушения при коротких импульсах нагружения (бесконечно малые силовые импульсы способны приводить к разрушению), а критерий Шемякина — Никифоровского — при длинных импульсах нагружения (отсутствует переход в статический режим). Структурно-временной критерий описывает разрушение во всем диапазоне длительностей нагружения. При этом чем больше пороговый силовой импульс U_* при заданной длительности действия нагрузки T , тем больше динамическая прочность материала.

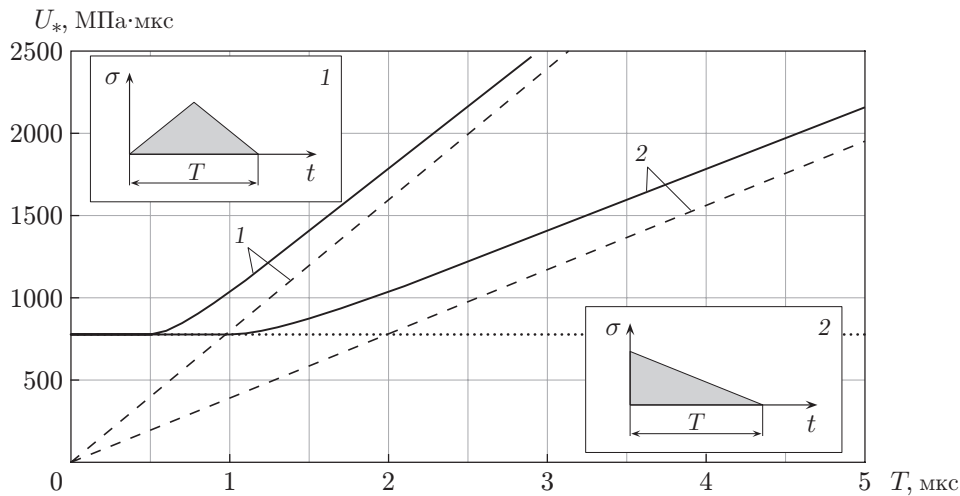


Рис. 3. Зависимость порогового импульса разрушения от длительности нагружения для рельсовой стали марки Ст.700:

1 — импульс треугольной формы с участками нарастания и затухания, 2 — импульс треугольной формы без участка нарастания; сплошные линии — критерий, предложенный в данной работе, штриховые — критерий критического напряжения $\sigma \leq \sigma_c$, пунктирная — критерий Шемякина — Никифоровского

Физически более обоснованной предельной характеристикой является импульсная емкость разрушения — произведение величины пороговой амплитуды напряжения P_* и времени до разрушения t_* : $G = P_* t_*$. На рис. 4 представлена зависимость импульсной емкости разрушения от длительности нагружения $G(T)$ для стали марки Ст.700.

Следует отметить, что зависимость $G(T)$ имеет характерный минимум, который обусловлен тем, что при увеличении длительности нагрузки время до разрушения t_* увеличивается, а пороговая амплитуда нагрузки P_* уменьшается. Это позволяет подобрать длительность нагрузки таким образом, чтобы добиться разрушения материала при минимальных затратах энергии. Например, для импульса треугольной формы с участками нарастания и убывания амплитуды длительность нагрузки равна $T_1 = 1,7$ мкс, а для импульса только с участком затухания — $T_2 = 3,2$ мкс (см. рис. 4). Минимальная емкость разрушения G_{\min} для этих профилей составляет 2481,9 и 2034,2 МПа·мкс соответственно. Таким образом, при одном и том же силовом импульсе нагружения, равном $PT/2$, минимальная емкость разрушения для профиля треугольной формы без участка нарастания на 18 % меньше, чем для соответствующего симметричного профиля треугольной формы.

Согласно [9] наименьшая емкость равна “кванту” разрушения $\sigma_c \tau$. Действительно, пусть импульс напряжения имеет вид ступенчатой функции Хевисайда $H(t)$ с амплитудой, равной статической прочности материала на растяжение σ_c :

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

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

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

Очевидно, что $t_* = \tau$ и, следовательно, $G = \sigma_c \tau$.

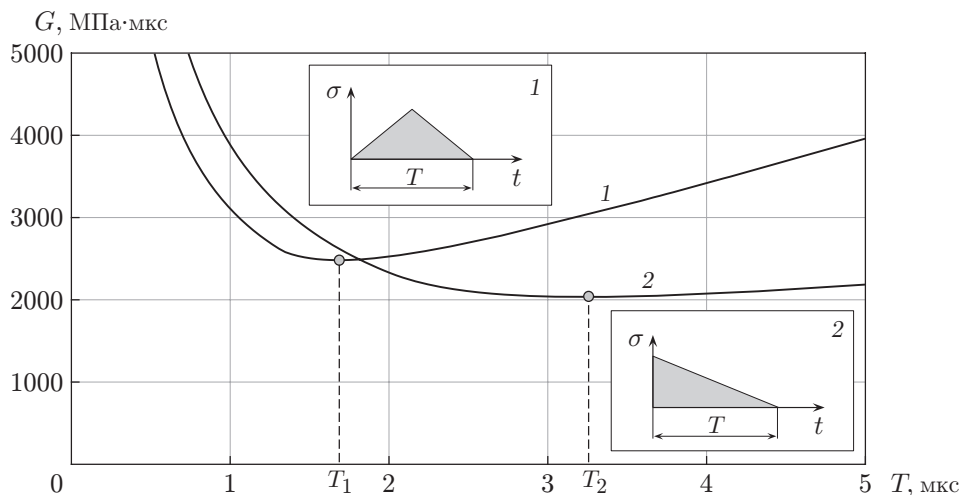


Рис. 4. Зависимость импульсной емкости разрушения от длительности нагружения для рельсовой стали марки Ст.700:

1 — импульс треугольной формы с участками нарастания и затухания, 2 — импульс треугольной формы без участка нарастания

4. Обсуждение результатов. Динамическая прочность является функцией временных характеристик нагружения, что подтверждается многочисленными экспериментами. Обычно считается, что динамическая прочность зависит лишь от скорости приложения нагрузки, при этом не учитываются форма импульса нагрузки, его длительность и амплитуда. Однако из экспериментальных данных следует, что при интенсивном импульсном воздействии, когда амплитуды внешних нагрузок оказываются существенно больше разрушающей статической нагрузки, образцы не разрушаются. Пороговая разрушающая нагрузка (динамический предел прочности) существенно зависит от истории нагружения и не может быть принята в качестве механической константы материала. Этот вывод справедлив и для энергии, необходимой для образования новых поверхностей. Введем величину удельной емкости разрушения материала $\gamma = cG$, где c — скорость упругих волн. Очевидно, что величина γ , так же как и G , будет изменяться в зависимости от формы импульса и иметь минимум. Для стали марки Ст.700 ($c = 5000$ м/с) $\gamma_{\min} = 12,41$ МДж/м² для треугольного импульса с участками нарастания и затухания и $\gamma_{\min} = 10,17$ МДж/м² для треугольного импульса без участка нарастания.

Форма волны напряжения в образце зависит от схемы испытаний, которая может иметь вид равнобедренного или прямоугольного треугольника, трапеции или быть синусоидальной. Поэтому неправомерно рассматривать значения пороговых (предельных) характеристик, определенных для произвольно выбранных условий импульсного нагружения, в качестве констант прочности материалов.

Кроме того, многообразие форм приложенного импульса обуславливает различие положения кривых временной зависимости прочности на плоскости (P_*, t_*) (см. рис. 2). Поэтому можно говорить о “неустойчивости” поведения кривых откольной прочности, чем объясняется большой разброс экспериментально определенных значений динамической прочности при ударно-волновом отколе одного и того же материала.

Следует отметить, что, выбирая форму нагружающего импульса и используя критерий (1), можно добиться значительного увеличения и последующей стабилизации откольной прочности (см. рис. 1 в работе [10]).

Заключение. В работе показано, что откольная прочность зависит от истории нагружения.

Форма импульса оказывает значительное влияние на величину критических напряжений и положение откола. Откольную прочность и другие пороговые характеристики динамического разрушения можно рассматривать как свойство материала, учитывая конкретные условия испытания. Большой разброс экспериментально полученных значений прочности материала на отрыв при динамическом нагружении является следствием “неустойчивости” поведения временной зависимости прочности.

Введение характерного времени разрушения позволяет объяснить на макроскопическом масштабном уровне влияние скорости нагружения на разрушение материала, что необходимо при разработке методик тестирования и сертификации прочностных свойств конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Златин Н. А., Пугачев Г. С., Мочалов С. М. и др.** Временные закономерности процесса разрушения при интенсивных нагрузках // Физика твердого тела. 1974. Т. 16, № 6. С. 1752–1755.
2. **Златин Н. А., Пугачев Г. С., Мочалов С. М. и др.** Временная зависимость прочности металлов при долговечностях микросекундного диапазона // Физика твердого тела. 1975. Т. 17, № 9. С. 2599–2602.
3. **Petrov Yu. V., Utkin A. A.** Dependence of the dynamic strength on loading rate // Soviet Materials Sci. 1989. V. 25, iss. 2. P. 153–156.
4. **Petrov Yu. V., Smirnov I. V., Utkin A. A.** Effects of strain-rate strength dependence in nanosecond load duration range // Mech. Solids. 2010. V. 45, N 3. P. 476–484.
5. **Никифоровский В. С.** Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. И. Шемякин. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979.
6. **Иванов А. Г.** Откол в квазиакустическом приближении // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 475–480.
7. **Смирнов В. И.** О пороговых силовых импульсах при откольном разрушении материалов // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 5. С. 97–106.
8. **Petrov Yu. V., Smirnov V. I.** Interrelation between the threshold characteristics of erosion and spall fracture // Tech. Phys. 2010. V. 55, N 2. P. 230–235.
9. **Петров Ю. В.** О “квантовой” природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321, № 1. С. 66–68.
10. **Petrov Yu. V., Utkin A. A.** Time dependence of the spall strength under nanosecond loading // Tech. Phys. 2015. V. 60, N 8. P. 1162–1166.

*Поступила в редакцию 19/VII 2016 г.,
в окончательном варианте — 30/III 2017 г.*