

УДК 539.3

О ПОРОГОВЫХ СИЛОВЫХ ИМПУЛЬСАХ ПРИ ОТКОЛЬНОМ РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Смирнов

Петербургский государственный университет путей сообщения, 198103 Санкт-Петербург
E-mail: smirnov@VS13866.spb.edu

В рамках классической одномерной схемы рассмотрен процесс откольного разрушения. Результаты анализа использованы для прогнозирования динамических прочностных свойств некоторых конструкционных материалов, в частности рельсовых сталей. Получена зависимость времени разрушения материала от пороговой амплитуды и длительности нагружения. Предложена модель для сравнительной оценки динамической прочности материалов, построены соответствующие диаграммы. Показана возможность оптимизации процесса разрушения путем подбора длительности нагружения материала.

Ключевые слова: откол, временная зависимость прочности, пороговый силовой импульс, структурно-временной критерий.

Введение. Традиционные представления о прочности и методы тестирования механических свойств материалов и конструкций оказываются неэффективными при описании процессов, происходящих в условиях интенсивного скоростного нагружения. Для анализа скоростных режимов эксплуатации различных конструкций требуются новые критерии разрушения твердых тел, способные адекватно описывать процесс динамического разрыва материалов.

Одним из наиболее важных экспериментов, используемых при тестировании динамических прочностных свойств конструкционных материалов, является эксперимент по отколу в твердых телах.

В данной работе исследуются пороговые характеристики откольной прочности некоторых рельсовых сталей с целью развития новых методов расчета при решении проблем безопасности скоростных транспортных систем.

1. Временная зависимость прочности. Рассмотрим процесс откольного разрушения в рамках традиционной модельной схемы [1]. Первые попытки анализа откола были основаны на применении критерия критического напряжения

$$\sigma \leq \sigma_c \quad (1.1)$$

(σ_c — статическая прочность материала). Как показали эксперименты, этот критерий не объясняет ряд особенностей откольного разрушения, в частности временную зависимость прочности и пространственное распределение разрушения [1].

Для объяснения некоторых наблюдаемых в экспериментах явлений, таких как появление динамической ветви и образование протяженной кавитационной зоны, в [1] предложен временной критерий

$$\int_0^{t_*} \sigma(t) dt \leq J_c \quad (1.2)$$

(J_c — критический импульс). Этот критерий, используемый для анализа разрушения, вызываемого очень короткими импульсами нагрузки, позволяет обосновать многие важные характеристики откола, в частности объяснить увеличение прочности (критического напряжения разрыва) материалов с ростом скорости нагружения. Однако результаты экспериментов и фрактографического анализа разрушения свидетельствуют о значительном влиянии структуры на этот процесс. Учет структурных особенностей разрушения позволяет получить новую информацию о временной зависимости прочности материала, объяснение и теоретическое описание которой до сих пор является актуальной задачей. Вместе с тем сложные физические теории разрушения, учитывающие структурные процессы, не всегда эффективны при решении инженерно-практических задач. Поэтому целесообразна разработка более простых методов, которые учитывают основные особенности динамического разрушения.

В качестве такого подхода в [2] предложен структурно-временной критерий, учитывающий импульсные характеристики поля напряжений и структурные особенности материала. В случае “бездефектных” сред (в частности, при отколе) он имеет вид

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(s) ds \leq \sigma_c \tau, \quad (1.3)$$

где τ — инкубационное (структурное) время разрушения.

Используем соотношение (1.3) для анализа откольного разрушения образцов рельсовых сталей различных марок. Рассмотрим отражение импульса сжимающего напряжения треугольного профиля (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 падающего импульса записывается в следующем виде:

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

Здесь P — амплитуда импульса; c — скорость звука в материале; $2t_0$ — продолжительность звука; $H(t)$ — функция Хевисайда. После отражения от свободного конца профиль напряжения имеет вид

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

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

Анализ поведения $\sigma(x, t)$ показывает, что максимум растягивающего напряжения впервые возникает в точке $x_0 = ct_0/2$. Введем безразмерные величины $T = t/\tau$, $T_0 = t_0/\tau$. Тогда

$$\begin{aligned} \sigma(T) \Big|_{x=x_0} = F(T) + G(T), \\ F(T) = -P \left\{ \left(\frac{1}{2} + \frac{T}{T_0} \right) \left[H \left(T + \frac{T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{T_0}{2} \right) \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{3}{2} - \frac{T}{T_0} \right) \left[H \left(T - \frac{T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

$$G(T) = P \left\{ \left(\frac{T}{T_0} - \frac{1}{2} \right) \left[H \left(T - \frac{T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right) \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{5}{2} - \frac{T}{T_0} \right) \left[H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{5T_0}{2} \right) \right] \right\}.$$

Пороговую (минимальную) разрушающую амплитуду P_* при заданной длительности t_0 находим из условия (согласно критерию (1.3))

$$\max_T I(T) = \sigma_c, \quad I(T) = \int_{T-1}^T \sigma(s) ds. \quad (1.4)$$

Интегрируя $\sigma(T)$ по T , получаем

$$I_-(T) = \int_{T-1}^T F(s) ds = -\frac{PT_0}{2} \{ [f_1(T) - f_1(T-1)] - [f_2(T) - f_2(T-1)] + f_3(T) \},$$

$$f_1(T) = \left(\frac{1}{2} + \frac{T}{T_0} \right)^2 \left[H \left(T + \frac{T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{T_0}{2} \right) \right],$$

$$f_2(T) = \left(\frac{3}{2} - \frac{T}{T_0} \right)^2 \left[H \left(T - \frac{T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right) \right],$$

$$f_3(T) = 2H \left(\frac{T_0}{2} - T + 1 \right) H \left(T - \frac{T_0}{2} \right),$$

$$I_+(T) = \int_{T-1}^T G(s) ds = \frac{PT_0}{2} \{ [g_1(T) - g_1(T-1)] - [g_2(T) - g_2(T-1)] + g_3(T) \},$$

$$g_1(T) = \left(\frac{1}{2} - \frac{T}{T_0} \right)^2 \left[H \left(T - \frac{T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right) \right],$$

$$g_2(T) = \left(\frac{5}{2} - \frac{T}{T_0} \right)^2 \left[H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right) - H \left(T - \frac{5T_0}{2} \right) \right],$$

$$g_3(T) = 2H \left(\frac{3T_0}{2} - T + 1 \right) H \left(T - \frac{3T_0}{2} \right),$$

$$I(T) = I_-(T) + I_+(T).$$

Из результатов анализа функции $I(T)$ следует, что

$$\max_T I(T) = \begin{cases} I(3T_0/2 + 2/3), & T_0 \geq 2/3, \\ I(T_0 + 1), & T_0 \leq 2/3, \end{cases}$$

т. е. время до разрушения равно

$$T_* = \begin{cases} 3T_0/2 + 2/3, & T_0 \geq 2/3, \\ T_0 + 1, & T_0 \leq 2/3. \end{cases} \quad (1.5)$$

При таких значениях аргумента достигается максимум функции $I(T)$:

$$\max_T I(T) = I(T_*) = \begin{cases} P(1 - 1/(3T_0)), & T_0 \geq 2/3, \\ 3PT_0/4, & T_0 \leq 2/3. \end{cases} \quad (1.6)$$

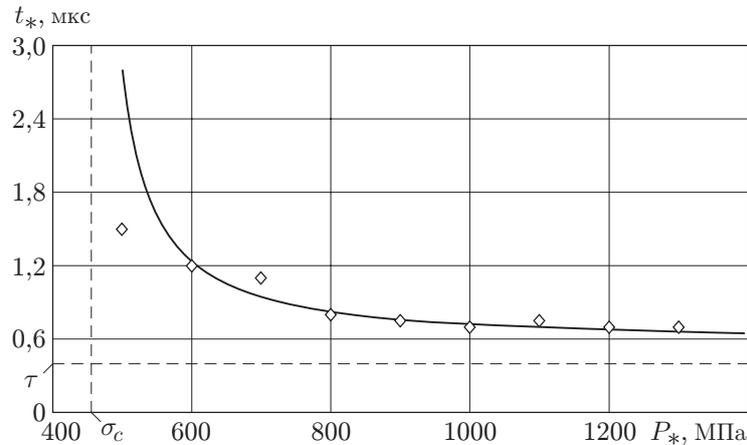


Рис. 1. Зависимость прочности алюминиевого сплава В95 от времени ($\sigma_c = 456$ МПа, $\tau = 0,45$ мкс):

сплошная линия — расчет по формуле (1.7); точки — экспериментальные данные [3]; вертикальная штриховая линия — асимптота статической ветви; горизонтальная штриховая линия — асимптота динамической ветви

Из соотношения (1.4) с учетом условия (1.5) можно определить время до разрушения T_* в зависимости от пороговой амплитуды P_* :

$$T_* = \begin{cases} 1/(2(1 - \sigma_c/P_*)) + 2/3, & 1 \leq P_*/\sigma_c \leq 2, \\ 4\sigma_c/(3P_*) + 1, & P_*/\sigma_c \geq 2. \end{cases} \quad (1.7)$$

Полученное соотношение (1.7) между временем разрушения T_* (или в размерном виде $t_* = T_*\tau$) и пороговой амплитудой P_* представляет собой временную зависимость прочности. На рис. 1 приведена зависимость (1.7) для алюминиевого сплава В95, а также результаты экспериментов по откольному разрушению [3].

Динамическая прочность не является константой материала, а зависит от времени до разрушения (“долговечности” образца). Введение инкубационного времени τ позволяет построить единую кривую временной зависимости прочности: статическая (вертикальная асимптота на рис. 1) и динамическая (горизонтальная асимптота) ветви соединены плавным переходом. Отметим, что критерий критического напряжения (1.1) описывает лишь статическую ветвь, а критерий (1.2) — только динамическую. Впервые временная зависимость прочности экспериментально получена в [3, 4] и проанализирована в работах [5, 6] и др.

Анализ временной зависимости прочности позволяет сделать выводы о взаимосвязи квазистатического и динамического механизмов разрушения при отколе и диапазонах, в которых они проявляются. Откольную прочность материала характеризует полученная зависимость $P_*(t_*)$ (см. рис. 1), на которой динамическому механизму разрушения соответствуют значения динамической ветви, определяемые структурной характеристикой τ . При этом положение динамической ветви не зависит от статической прочности материала σ_c , что подтверждается экспериментальными данными. Переходная зона соответствует совместному проявлению динамического и квазистатического механизмов разрушения. В этой зоне порог разрушения зависит как от динамического параметра разрушения τ , так и от статической прочности материала. Статическая ветвь полностью определяется пределом статической прочности материала σ_c .

Таблица 1

Марка стали (профиль)	σ_c , МПа	K_{Ic} , МПа · м ^{1/2}	d , мм	τ , мкс	Источник
RS1400 (РЖД)	1452	43,0	0,56	0,11	[7]
1100 CrSiV (136RE)	1173	37,9	0,67	0,13	[8]
900 CrSiV (EB50)	1051	37,0	0,79	0,15	[8]
СННР (132RE)	1265	46,0	0,84	0,16	[8]
900В (А65)	964	39,5	1,07	0,21	[8]
900ASTM (MRS67)	901	40,0	1,25	0,24	[8]
75Г (РЖД)	1080	50,0	1,36	0,26	[9]
RS600 (РЖД)	680	40,0	2,20	0,42	[10]
RS700 (РЖД)	740	46,0	2,46	0,47	[10]
700 (МСЖД60)	777	70,0	5,17	1,00	[8]

Соотношения (1.5) позволяют установить физический смысл введенного в рассмотрение инкубационного времени. Запишем (1.5) в размерном виде:

$$t_* = \begin{cases} 3t_0/2 + 2\tau/3, & t_0 \geq 2\tau/3, \\ t_0 + \tau, & t_0 \leq 2\tau/3. \end{cases} \quad (1.8)$$

Из второго выражения в (1.8) следует, что $t_* \rightarrow \tau$ при $t_0 \rightarrow 0$. Таким образом, инкубационное время τ — это время до разрушения образца t_* при нагружении его пороговым импульсом бесконечно малой длительности (т. е. импульсом, имеющим вид дельта-функции Дирака). При пороговых нагрузках (амплитудах P_*) нулевой длительности время до разрушения не может быть меньше τ . Время до разрушения может быть меньше инкубационного лишь в случае сверхпороговых нагрузок, т. е. при ударах с перегрузкой.

2. Пороговые силовые импульсы разрушения для рельсовых сталей. Ниже приведены результаты расчета динамической прочности некоторых рельсовых сталей, механические характеристики которых указаны в табл. 1.

Инкубационное время τ определяется из экспериментов. При отсутствии экспериментальных данных величину τ можно приближенно определить из соотношения $\tau = d/c$ [2]. Результаты расчетов по этому соотношению удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов [4], полученными в некотором диапазоне определяющих пространственно-временных параметров. Здесь $d = 2K_{Ic}^2/(\pi\sigma_c^2)$ — структурный параметр разрушения; K_{Ic} — статическая вязкость разрушения; c — максимальная скорость упругих волн (в данном случае $c = \sqrt{E/\rho}$); E — модуль упругости; ρ — плотность материала (для рельсовой стали принято $E = 0,21 \cdot 10^6$ МПа, $\rho = 7800$ кг/м³). Значения инкубационного времени τ , рассчитанные по указанному выше соотношению, приведены в табл. 1.

На рис. 2 представлены результаты расчетов временной зависимости прочности для трех марок рельсовых сталей. Несмотря на то что сталь RS1400 (РЖД) имеет наибольшую квазистатическую прочность на разрыв, в условиях высокоскоростного ударного нагружения она обладает меньшей прочностью по сравнению с маркой стали 700 (МСЖД60). Это обусловлено ее меньшей трещиностойкостью. В целом, однако, сравнивать прочностные характеристики различных материалов по временной зависимости прочности достаточно затруднительно: материал может иметь более высокую, чем у других материалов, пороговую амплитуду P_* , но при этом характеризоваться малым временем до разрушения t_* , и наоборот (параметры P_* и t_* являются функциями длительности действия импульса $2t_0$). На практике целесообразно использовать зависимость некоторой интегральной прочностной характеристики от независимой (изменяемой в эксперименте) переменной $2t_0$. Такой характеристикой может служить величина порогового силового импульса U_* . Для заданного временного профиля (в виде равнобедренного треугольника) эта величина со-

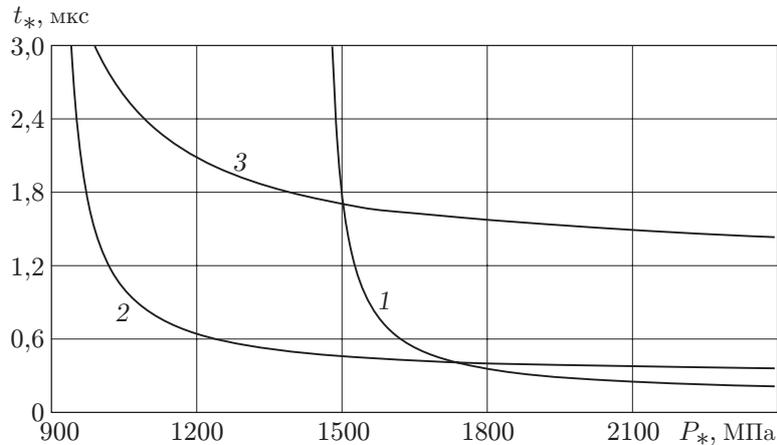


Рис. 2. Зависимость прочности некоторых марок рельсовых сталей от времени:
1 — RS1400 (РЖД); 2 — 900ASTM (MRS67); 3 — 700 (МСЖД60)

ставляет $U_* = P_* t_0$. Из соотношений (1.4) и (1.6) найдем значение пороговой амплитуды P_* в зависимости от времени нарастания (убывания) t_0 нагрузки:

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

Тогда пороговый импульс разрушения равен

$$U_* = \begin{cases} 3\sigma_c t_0^2 / (3t_0 - \tau), & t_0 \geq 2\tau/3, \\ 4\sigma_c \tau / 3, & t_0 \leq 2\tau/3. \end{cases} \quad (2.1)$$

Первое выражение в (2.1) соответствует статической ветви, второе — динамической. Зависимость пороговой амплитуды разрушения от продолжительности импульса $U_*(2t_0)$ для трех марок рельсовых сталей приведена на рис. 3. Видно, что чем больше пороговый силовой импульс U_* при заданной продолжительности действия нагрузки $2t_0$, тем выше динамическая прочность рельсовой стали, т. е. тем большее сопротивление оказывает она ударным динамическим нагрузкам. Так, при длительности нагружения, не превышающей 1,4 мкс, наиболее прочной из трех рассмотренных является сталь марки 700 (МСЖД60), а при временах нагружения более 1,4 мкс — сталь марки RS1400 (РЖД). Сталь марки 900ASTM (MRS67) занимает промежуточное положение при $2t_0 < 0,3$ мкс и $2t_0 > 4$ мкс. В диапазоне длительностей нагружения $0,3 < 2t_0 < 4,0$ мкс она оказывается наименее прочной.

Другой предельной характеристикой разрушения является произведение пороговой амплитуды разрушения и времени до разрушения $G = P_* t_*$. В отличие от порогового силового импульса разрушения эта величина (будем называть ее количеством разрушения) не является классической физической характеристикой, однако в данной задаче она оказывается наиболее информативной.

На рис. 4 представлены зависимости количества разрушения от длительности нагружения для трех марок рельсовых сталей. Следует отметить, что указанные зависимости имеют минимум (точки A_1, A_2, A_3 на рис. 4), который обусловлен тем, что с увеличением длительности нагрузки время до разрушения t_* увеличивается, а пороговая амплитуда нагрузки P_* , наоборот, уменьшается. Указанное обстоятельство позволяет подобрать длительность нагрузки таким образом, чтобы добиться разрушения материала с минимальными затратами энергии. Например, для стали марки RS1400 (РЖД) такая длительность

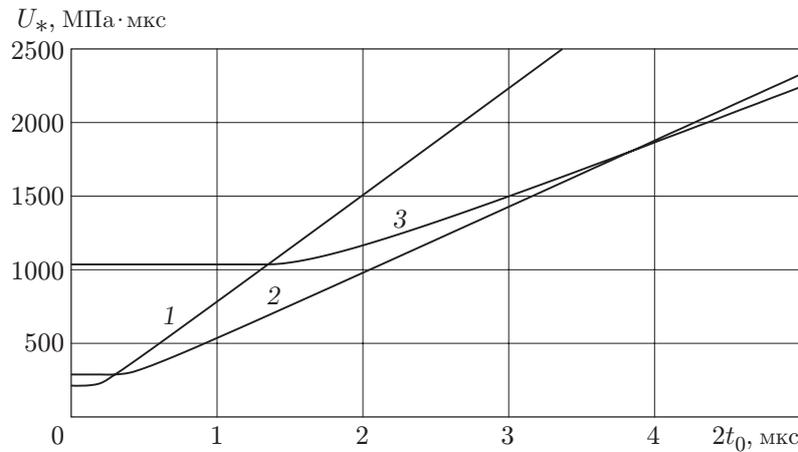


Рис. 3. Пороговый импульс разрушения для некоторых марок рельсовых сталей (обозначения те же, что на рис. 2)

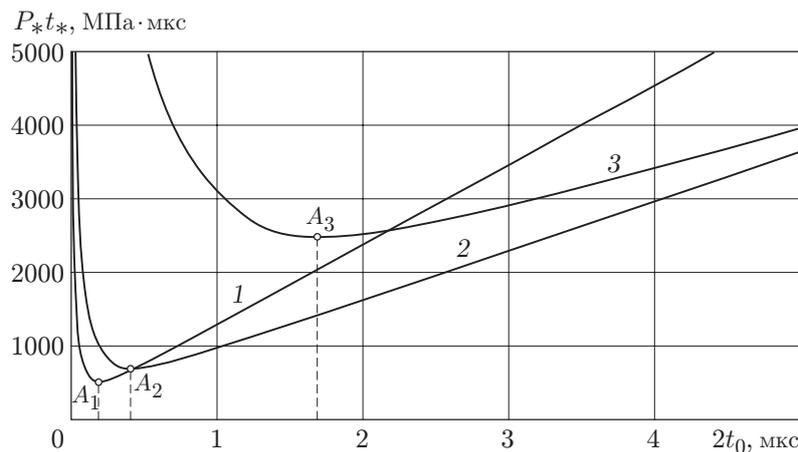


Рис. 4. Количество разрушения для некоторых марок рельсовых сталей (обозначения те же, что на рис. 2)

нагрузки равна 0,18 мкс, а для стали марки 700 (МСЖД60) — 1,7 мкс. Минимальное количество разрушения для этих марок стали составляет $G_{\min} = 510,5; 2482,0$ МПа·мкс соответственно. Оптимальная длительность нагрузки $2t_0^{opt}$ и соответствующий ей минимум количества разрушения G_{\min} для различных марок рельсовых сталей приведены в табл. 2. При оптимальной длительности нагрузки наиболее прочной из рассмотренных оказывается сталь марки 700 (МСЖД60), наименее прочной — сталь марки 1100 CrSiV (136RE).

Согласно теории [11] минимальное количество разрушения равно “кванту” разрушения $\sigma_c \tau$ (рис. 5). В этом случае область перехода из квазистатического режима нагружения в динамический и наоборот на зависимости $P_*(t)$ представляет собой точку с координатами (σ_c, τ) . Для реальных материалов указанная область имеет некоторую протяженность, которой соответствует определенный диапазон длительности нагружения. Каждому значению длительности нагружения на временной зависимости прочности соответствует единственная точка с координатами (P^*, t^*) . Перемещаясь по зависимости, можно найти наименьшее количество разрушения G_{\min} , которому соответствует минимальная площадь прямоугольника $P^* t^*$.

Таблица 2

Марка стали (профиль)	G_{\min} , МПа · мкс	$2t_0^{opt}$, мкс
RS1400 (РЖД)	510,5	0,18
1100 CrSiV (136RE)	487,1	0,22
900 CrSiV (EB50)	503,6	0,25
СНHR (132RE)	646,5	0,27
900B (A65)	646,6	0,35
900ASTM (MRS67)	690,7	0,40
75Г (РЖД)	896,9	0,44
RS600 (РЖД)	912,3	0,71
RS700 (РЖД)	1111,0	0,78
700 (МСЖД60)	2482,0	1,70

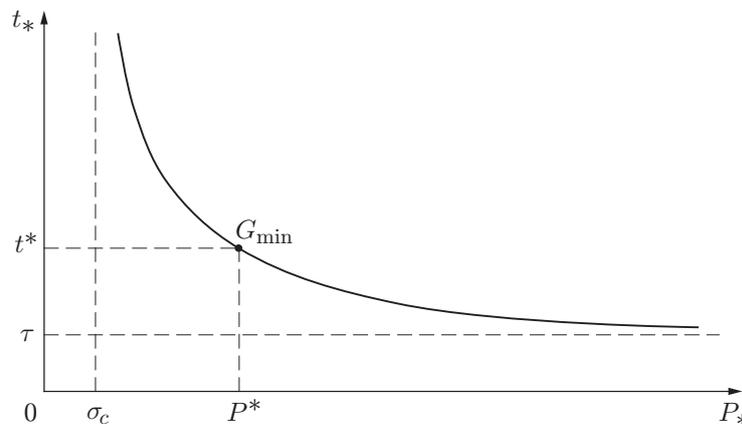


Рис. 5. Зависимость прочности от времени при испытаниях на откол

3. Соотношение пороговых импульсов разрушения для материалов с различной внутренней структурой. Полученные пороговые диаграммы позволяют сделать вывод, что откольная прочность материала существенно зависит от исходной статической прочности на разрыв и скорости упругих волн. Последняя определяется модулем упругости и плотностью материала. Результаты приведенных выше расчетов получены для различных марок сталей, т. е. для материалов с кристаллической структурой. Исследуем поведение порогового импульса разрушения для материалов с существенно различной внутренней структурой, а именно для металла и полимера. В качестве примера рассмотрим полиметилметакрилат (ПММА) и сталь марки AISI 4340 (табл. 3). Для ПММА инкубационное время экспериментально определено в работе [12], а для стали марки AISI 4340 — в работе [13].

Пороговый силовой импульс, предел прочности и инкубационное время для стали марки AISI 4340 обозначим через U'_* , σ'_c , τ' , а аналогичные характеристики ПММА — через U''_* , σ''_c , τ'' . Тогда согласно выражению для амплитуды порогового силового импульса (2.1) имеет место соотношение

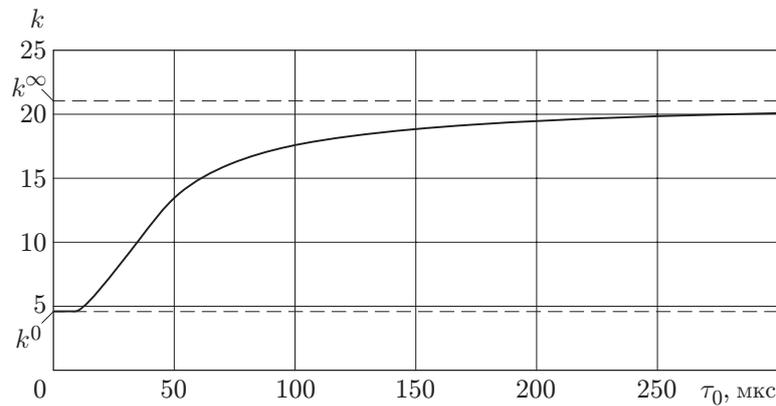
$$k = \frac{U'_*}{U''_*} = \begin{cases} \sigma'_c \tau' / (\sigma''_c \tau'') \equiv k^0, & \tau_0 \rightarrow 0, \\ \sigma'_c / \sigma''_c \equiv k^\infty, & \tau_0 \rightarrow \infty, \end{cases} \quad (3.1)$$

где $\tau_0 = 2t_0$.

Зависимость $k(\tau_0)$ представлена на рис. 6. Характер этой зависимости свидетельствует о том, что на статической ветви (второе выражение в (3.1)) относительная прочность рассматриваемых материалов определяется соотношением пределов их статической проч-

Таблица 3

Материал	σ_c , МПа	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	E , ГПа	ρ , кг/м ³	c , м/с	τ , мкс
ПММА	70	1,47	2,45	1089	1500	32
AISI 4340	1490	50	208	7800	5165	7

Рис. 6. Зависимость $k(\tau_0)$

ности на разрыв, а на динамической ветви (первое выражение в (3.1)) — соотношением произведений предела прочности и инкубационного времени. В предельных случаях получаем $k^\infty = 21,3$ при $\tau_0 \rightarrow \infty$, $k^0 = 4,7$ при $\tau_0 \rightarrow 0$. Иными словами, в динамических условиях различие прочностных свойств ПММА и стали марки AISI 4340 менее существенно, чем в статических.

Заключение. Результаты расчетов временной зависимости прочности для рельсовых сталей различных марок свидетельствуют о том, что стали, имеющие достаточно высокую квазистатическую прочность на разрыв, при высокоскоростном ударном нагружении обладают меньшей прочностью, что обусловлено их более низкой трещиностойкостью. Для комплексной сравнительной оценки откольной прочности материала в качестве критерия целесообразно использовать величину, представляющую собой произведение пороговой амплитуды и времени до разрушения.

Результаты анализа полученных диаграмм позволяют сделать вывод, что интенсивность разрушения существенно зависит от исходной статической прочности на разрыв и скорости волн напряжений, которая определяется модулями упругости и плотностью материала. Это означает, что более жесткие материалы и материалы с меньшей плотностью слабее сопротивляются быстрому динамическому нагружению. При этом прочностные свойства материалов с различной внутренней структурой (например, металлов и полимеров) при быстром динамическом нагружении различаются в значительно меньшей степени, чем при статическом нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979.
2. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1997.

3. **Златин Н. А., Пугачев Г. С., Мочалов С. М., Брагов А. М.** Временная зависимость прочности металлов при долговечностях микросекундного диапазона // Физика твердого тела. 1975. Т. 17, № 9. С. 2599–2602.
4. **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.
5. **Воловец Л. Д., Златин Н. А., Пугачев Г. С.** Кинетика разрушения полиметилметакрилата в плоской короткой волне растягивающих напряжений // Проблемы прочности и пластичности твердых тел. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. С. 35–42.
6. **Мещеряков Ю. И., Диваков А. К., Кудряшов В. Г.** О динамической прочности при отколе и пробое // Физика горения и взрыва. 1988. № 2. С. 126–134.
7. **Нестеров Д. К., Сапожков В. Е., Левченко Н. Ф. и др.** Конструкционная прочность и эксплуатационная стойкость рельсов из заэвтектоидной стали, термообработанных на высокую прочность // Транспорт: наука, техника, управление. 1991. № 8. С. 9–13.
8. **Производство упрочненных рельсов** // Ж. д. мира: Междунар. журн. 1991. № 11. С. 41–51.
9. **Ковчик С. Е., Морозов Е. М.** Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения // Механика разрушения и прочность материалов. Киев: Наук. думка, 1988. Т. 3.
10. **Филин А. Н., Челышев Н. А., Гульняшкин В. Н.** Исследование механических характеристик рельсовой стали опытно-промышленных плавок // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1991. № 2. С. 43, 44.
11. **Петров Ю. В.** О “квантовой” природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321, № 1. С. 66–68.
12. **Березкин А. Н., Кривошеев С. И., Петров Ю. В. и др.** Эффект запаздывания старта трещины при пороговых импульсных нагрузках // Докл. РАН. 2000. Т. 375, № 3. С. 328–330.
13. **Homma H., Shockey D. A., Murayama Y.** Response of cracks in structural materials to short pulse loads // J. Mech. Phys. Solids. 1983. V. 31, N 3. P. 261–279.

Поступила в редакцию 29/XI 2005 г.
