

05

## Связь прочности материалов с параметрами импульсного механического воздействия

© С.И. Кривошеев, И.Б. Кузнецов, Ю.Э. Адамьян, С.Г. Магазинов, М.И. Лобачев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: kuznetsov\_ib@inbox.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2026 г.  
В окончательной редакции 12 марта 2026 г.  
Принято к публикации 22 марта 2026 г.

В рамках аналитического описания процесса деформирования показано, что процесс разрушения при импульсном воздействии определяется предельной плотностью потенциальной энергии и временем жизни энергетического состояния. Продемонстрирован переход к хрупкому режиму разрушения при высокоскоростном нагружении магнитно-импульсным способом высокопластичных при статическом нагружении полиэтилена и полиэтилентерефталата.

**Ключевые слова:** пластические деформации, высокоскоростное деформирование, магнитно-импульсное нагружение, управляемое воздействие.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.12.62981.20651

Импульсная механическая прочность материалов существенно зависит не только от их свойств (плотность, модуль Юнга, статическая прочность на разрыв, температура и т.д.), но и от режимов нагружения. Известно, что и при испытаниях материала в откольной схеме нагружения в ударно-волновом [1–6] и динамических режимах [7–10], и при испытаниях на динамическую трещиностойкость [11,12] наблюдаются рост разрушающих нагрузок при уменьшении длительности воздействия [13,14] и задержка разрушения [15,16].

На прочностных зависимостях отчетливо наблюдается два режима: статический и импульсный, при этом для импульсного режима характерным является превышение разрушающими нагрузками статических значений с уменьшением времени воздействия.

Известно, что предельная удельная работа деформирования, соответствующая плотности энергии при разрушении, определяется соотношением

$$A_{def} = \int_0^{\varepsilon_{fr}} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_{fr}} E \varepsilon d\varepsilon, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{fr}$  — предельная относительная деформация,  $\sigma$  — механическое напряжение,  $E$  — коэффициент пропорциональности между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  (в упругом случае равный модулю упругости  $E_Y$ ). Типичный вид деформационной зависимости представлен на рис. 1.

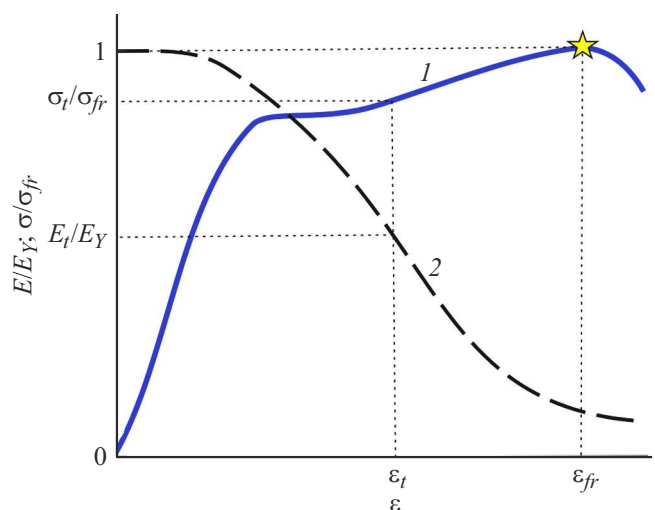
При импульсном воздействии, когда параметры деформирования зависят и от времени, деформационная зависимость подстраивается под режим нагружения, и,

учитывая, что  $E(t) \Leftrightarrow E_t(t) = \sigma_t(t)/\varepsilon_t(t)$ , можно записать

$$A_{def}(t) = \int_0^t E(t)\varepsilon(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} dt. \quad (2)$$

Считаем, что разрушение определяется максимально достижимым в процессе воздействия напряжением  $\sigma_{fr} = \sigma_{max}$ . Подынтегральное выражение формулы (2) может быть преобразовано к виду

$$\begin{aligned} E(t)\varepsilon(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} &= E(t) \frac{\sigma(t)}{E(t)} \frac{d}{dt} \left( \frac{\sigma(t)}{E(t)} \right) \\ &= \sigma(t) \left[ E(t) \frac{d\sigma(t)}{dt} - \sigma(t) \frac{dE(t)}{dt} \right] \frac{1}{E(t)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$



**Рис. 1.** Диаграмма деформирования материала с нелинейными механическими свойствами (1) и изменение коэффициента пропорциональности между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  (2).

Работа внешних сил может быть представлена в виде двух слагаемых

$$A_{def}(t) = \int_0^t \sigma(t) \left[ E(t) \frac{d\sigma(t)}{dt} \right] \frac{1}{E(t)^2} dt - \int_0^t \sigma(t) \left[ \sigma(t) \frac{dE(t)}{dt} \right] \times \frac{1}{E(t)^2} dt = A_{def}(t)|_I + A_{def}(t)|_{II}. \quad (4)$$

Обозначим работу внешних сил к моменту  $t = t_{fr}$  как  $A_{def}^{fr} = A_{def}(t_{fr})$ . Проведя преобразование согласно первой теореме о среднем и проинтегрировав до момента разрушения, получаем

$$A_{def}^{fr}|_I = \left( \frac{1}{E(t)} \right) \frac{(\sigma|_{t_{fr}})^2}{2}, \quad (5)$$

и, учитывая, что  $\sigma(t)^2 dt = d(\sigma(t)^2 t) - 2t\sigma(t)d\sigma(t)$ , получаем

$$A_{def}^{fr}|_{II} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{E(t)} \right) \int_0^{t_{fr}} \sigma(t)^2 dt = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{E(t)} \right) \left( \int_0^{t_{fr}} d(t\sigma(t)^2) - \int_0^{t_{fr}} 2t\sigma(t)d\sigma(t) \right) = (\sigma|_{t_{fr}})^2 (t_{fr} - \hat{t}) \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{E(t)} \right) = (\sigma|_{t_{fr}})^2 t_{fr} \left( 1 - \frac{\hat{t}}{t_{fr}} \right) \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{E(t)} \right). \quad (6)$$

Коэффициенты  $\left( \frac{1}{E(t)} \right)$  и  $\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{E(t)} \right)$  определяют среднее значение обратного модуля и его производной соответственно на интервале интегрирования, а  $\hat{t}$  характеризует влияние вида временной зависимости нагружения на процесс пластического деформирования, многофакторность которого проявляется на различных пространственно-временных масштабах (см., например, [17,18]). Анализ пластического режима деформирования, изучению которого посвящены многочисленные работы, выходит за рамки данного исследования.

Таким образом, работа внешних сил, затраченная на разрушение, определяется максимально достижимым напряжением  $\sigma_{fr}$  и расходует по двум основным каналам: на диссипацию энергии при пластическом деформировании и накопление потенциальной энергии упругих деформаций. Распределение энергопотоков между каналами определяется свойствами материала  $E(\sigma, t)$  и историей нагружения

$$A_{def}(t) = \frac{(\sigma|_{t_{fr}})^2}{2E_Y} \left( \left( \frac{1}{E(t)} \right) E_Y + (t_{fr} - \hat{t}) \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{E(t)} \right) 2E_Y \right) = \frac{(\sigma|_{t_{fr}})^2}{2E_Y} \left( \Psi(t)|_{el} + \Psi(t)|_{pl} \right) = \frac{(\sigma|_{t_{fr}})^2}{2E_Y} \Psi(t)|_{t_{fr}}. \quad (7)$$

Средняя за время деформирования до разрушения энергия

$$W_{def}^{fr} = \frac{1}{t_{fr}} \int_0^{t_{fr}} A_{def}(t) dt = \frac{1}{t_{fr}} \int_0^{t_{fr}} \frac{(\sigma(t))^2}{2E_Y} \left( \Psi(t)|_{el} + \Psi(t)|_{pl} \right) dt. \quad (8)$$

Как следует из (7), вид нагружения существенно влияет на распределение работы внешних сил между каналами потребления энергии (см. таблицу).

Так как независимо от режимов деформирования разрушение связано с нарушением сплошности материала, т.е. с разрывом атомарных связей, можно допустить, что предельная плотность упругой энергии, необходимая для разрушения, не зависит от времени нагружения до характерных атомарных времен. Введем параметр  $S_{fr} = W_{def}^{fr} t_{fr}$ , связывающий среднюю в процессе деформирования работу внешних сил и время до разрушения. При разрушении в близком к хрупкому режиму  $\Psi(t)|_{el} \rightarrow 1$ ,  $\Psi(t)|_{pl} \rightarrow 0$ , а  $W_{def}^{fr} = \widehat{\sigma}_{fr}^2 / 2E_Y$ , где  $\widehat{\sigma}_{fr}$  определяется зависимостью  $\sigma(t)$ . Тогда можно записать для разных  $\sigma_{fr}$  при одном виде нагружения

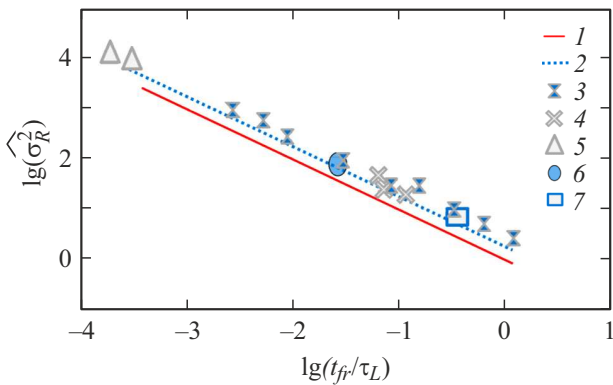
$$\frac{S_{fr1}}{S_{fr2}} : \Leftrightarrow D_W = 1 = \frac{(\widehat{\sigma}_{fr1})^2 (\Psi(t))|_1(t_{fr1})}{(\widehat{\sigma}_{fr2})^2 (\Psi(t))|_2(t_{fr2})} \approx \frac{(\widehat{\sigma}_{fr1})^2 (t_{fr1})}{(\widehat{\sigma}_{fr2})^2 (t_{fr2})}. \quad (9)$$

На практике важным является сопоставление разрушающих нагрузок в статическом и импульсных режимах, распределение энергий в которых несущественно отличается только в хрупких материалах. Однако, как следует из (7), и в остальных случаях разрушение определяется максимально достижимой потенциальной энергией  $W_{def}^{fr}$ , которая может быть ассоциирована с большим термодинамическим потенциалом (потенциалом Ландау), а время  $t_{fr}$  определяет время жизни напряженного состояния, необходимого для разрушения.

Как следует из (9),  $(\sigma_{fr1})^2 / (\sigma_{fr2})^2 = t_{fr2} / t_{fr1}$ , т.е. рост предельных нагрузок в режиме хрупкого разрушения не зависит от свойств материала, что отражает общность процесса разрушения. Индивидуальные свойства

Влияние вида нагружения на основные параметры

№ п/п	Вид нагружения	$\widehat{\sigma}_{fr} / \sigma_{fr}$	$\hat{t} / t_{fr}$
1	$\sigma(t) = \sigma_{fr} t$	$1/\sqrt{3}$	2/3
2	$\sigma(t) = \sigma_{fr} t^2$	$1/\sqrt{5}$	4/5
3	$\sigma(t) = \sigma_{fr} \sin(\omega t)$	$1/\sqrt{2}$	1/2
4	$\sigma(t) = \sigma_{fr} (\sin(\omega t))^2$	$\sqrt{0.375}$	5/8
5	$\sigma(t) = \sigma_{fr} \left( \frac{2}{1+e^{-2kt}} - 1 \right)$		
	при $k = 1/t_{fr}$	$\sqrt{0.434}$	0.761
	при $k = 2/t_{fr}$	$\sqrt{0.662}$	0.482
Диапазон изменения параметров		$0.636 \pm 30\%$	$0.639 \pm 25\%$



**Рис. 2.** Связь длительности разрушающего импульса и предельной потенциальной энергии. 1 — расчет по формуле (10), 2 — расчет по формуле (10) для линейно нарастающего воздействия, 3 — данные [13], 4 — 09G2S steel [16], 5 — Ti [19], 6 — Al [20], 7 — ПММА (полиметилметакрилат) [21].

материала проявляются при учете их статических характеристик. И если прочность материала в статике  $\sigma_0$  определена, то интервал времени  $\tau_L$ , определяющий время жизни напряженного состояния в статике  $(\sigma_0)^2$ , может быть формально определен из соотношения

$$\frac{(\sigma_{fr1})^2}{(\sigma_0)^2} = \frac{\tau_L}{t_{fr1}}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных по импульсному разрушению различных материалов, достаточно представительные для выделения вида и параметров нагружения, в координатах  $(t_{fr}/\tau_L$  и  $\widehat{\sigma_R^2})$ , где  $\widehat{\sigma_R^2} \equiv (\sigma_{fr}/\sigma_0)^2$ , при допущении независимости модуля Юнга от скорости нагружения. На этой зависимости представлены данные о поведении

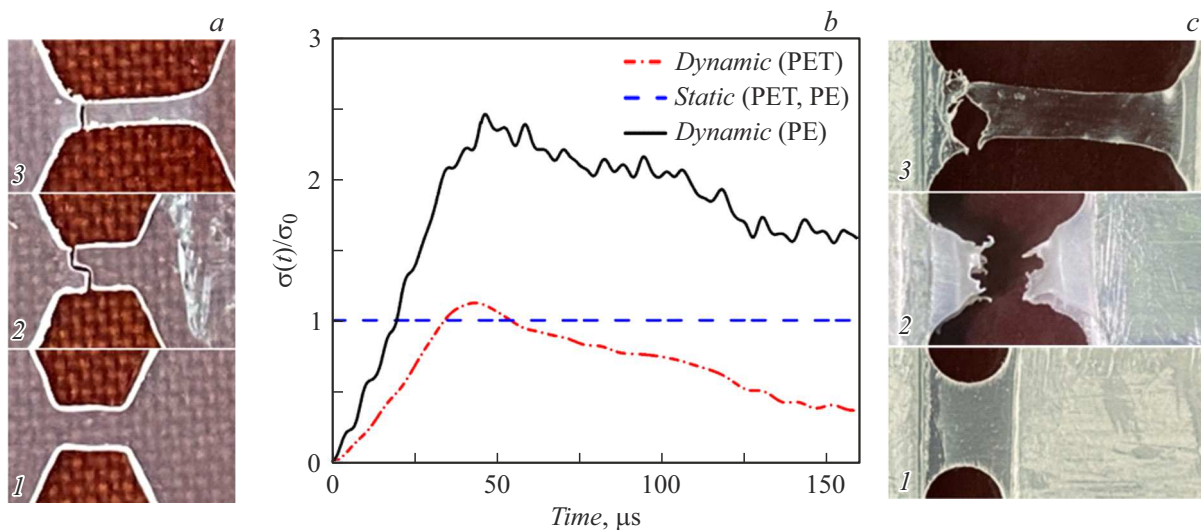
некоторых технологических [16,19–21] и природных материалов: габбро-диабазы, песчаника, гранита [13].

Наблюдаемый на рис. 2 разброс данных может являться следствием как недостаточной точности определения параметров нагружения, так и некоторого влияния скорости нагружения на модуль упругости  $\left(\frac{1}{E(t)}\right) E_Y \approx 1 \neq 1$ .

Повышение точности определения параметров нагружения можно получить, используя магнитно-импульсный способ формирования управляемых импульсов давления [22,23]. На рис. 3 приведены результаты высокоскоростного нагружения полимерных образцов магнитно-импульсным способом. Регистрация напряжений производилась по методике, описанной в [24].

Как видно из рис. 3, материалы, демонстрирующие пластический режим деформирования в статике, уже при скоростях нагружения  $\sim 6$  и  $1 \text{ MPa}/\mu\text{s}$  для полиэтилена и полиэтилентерефталата соответственно переходят в режим разрушения, близкий к хрупкому, т.е. без существенных пластических деформаций. При этом имеет место увеличение разрушающего напряжения относительно статического  $\sigma_0$ : для полиэтилентерефталата увеличение на 12% ( $\sigma_0 = 210 \text{ MPa}$ ), для полиэтилена увеличение на 133% ( $\sigma_0 = 12 \text{ MPa}$ ).

Проведенный анализ импульсного деформирования выявил влияние формы и амплитуды напряжений на параметры разрушения, при этом определяющей является потенциальная энергия упругого деформирования. Прогнозирование предельных импульсных воздействий на материал для известной временной зависимости напряжений возможно при известных параметрах материала. К ним следует отнести предельное разрушающее напряжение в статике и время жизни напряженного состояния, ответственное за темпоральность реакции материала на воздействие.



**Рис. 3.** a, c — вид образцов из полиэтилентерефталата (PET) и электротехнического полиэтилена (PE) соответственно: 1 — в исходном состоянии, 2 — после динамического нагружения, 3 — после статического нагружения. b — временная зависимость нагружения.

## Финансирование работы

Работа поддержана ГК „Росатом“ и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (ФПЗ), проект № FSEG-2025-0005 „Разработка конструкторских и технологических решений по обеспечению механической прочности и охлаждению центрального соленоида токамака ТРТ“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Р.И. Ильяев, В.Т. Пунин, А.Я. Учаев, С.А. Новиков, Е.В. Кошелева, Л.А. Платонова, Н.И. Сельченкова, Н.А. Юкина, Докл. АН, **393** (3), 326 (2003). [R.I. Il'kaev, V.T. Punin, A.Ya. Uchaev, S.A. Novikov, E.V. Kosheleva, L.A. Platonova, N.I. Sel'chenkova, N.A. Yukina, Dokl. Phys., **48**, 627 (2003). DOI: 10.1134/1.1631658].
- [2] G.I. Kanel, Int. J. Fract., **163**, 173 (2010). DOI: 10.1007/s10704-009-9438-0
- [3] F. Coppari, T. De Ressaéguier, S. Razorenov, T. Sekine, E. Zaretsky, J. Appl. Phys., **133**, 050401 (2023). DOI: 10.1063/5.0143414
- [4] С.А. Новиков, Сорос. образоват. журн., № 8, 116 (1999).
- [5] J.R. Klepaczko, A. Brara, Int. J. Impact Eng., **25**, 387 (2001). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X00000506/pdf?md5=32ec7355e6caa520b9b2fa4d3611e935&pid=1-s2.0-S0734743X00000506-main.pdf>
- [6] С.Н. Журков, Вестн. АН СССР, **11**, 78 (1957).
- [7] Вл.Вас. Баландин, Вл.Вл. Баландин, А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов, Изв. РАН. Механика твердого тела, № 6, 78 (2014). <http://elibrary.ru/item.asp?id=22767190> [Vl.Vas.. Balandin, Vl.Vl. Balandin, A.M. Bragov, L.A. Igumnov, A.Yu. Konstantinov, A.K. Lomunov, Mech. Solids, **49** (6), 666 (2014). DOI: 10.3103/S0025654414060089].
- [8] Q.B. Zhang, J. Zhao, Rock Mech. Rock Eng., **47**, 1411 (2014). DOI: 10.1007/s00603-013-0463-y
- [9] B. Wang, C. Wang, B. Liu, X. Zhang, Entropy, **21**, 1154 (2019). DOI: 10.3390/e21121154
- [10] Б.К. Барахтин, Ю.И. Мещеряков, Г.Г. Савенков, ЖТФ, **80** (1), 79 (2010). [B.K. Barakhtin, Yu.I. Mescheriakov, G.G. Savenkov, Tech. Phys., **55** (1), 79 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210010135].
- [11] K.R. Chandar, W.G. Knauss, Int. J. Fract., **20** (3), 209 (1982). DOI: 10.1007/BF01140336
- [12] S.I. Krivosheev, N.F. Morozov, Yu.V. Petrov, G.A. Shneerson, Mater. Sci., **32** (3), 286 (1996). DOI: 10.1007/BF02539165
- [13] S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, Univers. J. Phys. Appl., **10** (6), 181 (2016). DOI: 10.13189/ujpa.2016.100601
- [14] S.I. Krivosheev, N.V. Korovkin, V.K. Slastenko, S.G. Magazinov, Int. J. Mech., **9**, 293 (2015). <https://www.naun.org/main/NAUN/mechanics/2015/a702003-157.pdf>
- [15] А.Н. Березкин, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров, А.А. Уткин, Докл. АН, **375** (3), 328 (2000). [A.N. Berezkin, S.I. Krivosheev, Yu.V. Petrov, A.A. Utkin, Dokl. Phys., **45** (11), 617 (2000). DOI: 10.1134/1.1333869].
- [16] N.V. Mikhailova, I.V. Smirnov, V.V. Balandin, V.V. Balandin, A.M. Bragov, Yu.V. Petrov, Int. J. Impact Eng., **164**, 104194 (2022). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104194
- [17] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, Э.Г. Асланян, Т.С. Пирожкова, В.М. Васюков, ФТТ, **59** (9), 1778 (2017). DOI: 10.21883/ФТТ.2017.09.44851.443 [Yu.I. Golovin, A.I. Tyurin, E.G. Aslanyan, T.S. Pirozhkova, V.M. Vasyukov, Phys. Solid State, **59** (9), 1803 (2017). DOI: 10.1134/S1063783417090104].
- [18] Н.И. Сельченкова, А.Я. Учаев, Ядерная физика и инжиниринг, **15** (6), 613 (2024). DOI: 10.56304/S207956292406037X [N.I. Sel'chenkova, A.Ya. Uchaev, Phys. Atom. Nucl., **87** (10), 1473 (2024). DOI: 10.1134/S1063778824090369].
- [19] Е.В. Струлева, П.С. Комаров, С.И. Ашитков, ТВТ, **58** (5), 823 (2020). DOI: 10.31857/S0040364420050105 [E.V. Struleva, P.S. Komarov, S.I. Ashitkov, High Temp., **58** (5), 744 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20050090].
- [20] С.И. Ашитков, П.С. Комаров, А.В. Овчинников, Е.В. Струлева, М.Б. Агранат, Квантовая электроника, **43** (3), 242 (2013). [S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, A.V. Ovchinnikov, E.V. Struleva, M.B. Agranat, Quantum Electron., **43** (3), 242 (2013). DOI: 10.1070/QE2013v043n03ABEH015104].
- [21] P. Forquin, M. Nasraoui, A. Rusinek, L. Siad, Int. J. Impact Eng., **40-41**, 46 (2012). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.09.007
- [22] С.И. Кривошеев, ЖТФ, **75** (3), 49 (2005). [S.I. Krivosheev, Tech. Phys., **50** (3), 334 (2005). DOI: 10.1134/1.1884733].
- [23] S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, D.I. Alekseev, IEEE Trans. Plasma Sci., **46** (4), 1054 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2814073
- [24] N. Smailov, S. Koshkinbayev, Y. Tashtay, A. Kuttybayeva, R. Abdykadyrkyzy, D. Arseniev, D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V. Maluyugin, C. Sun, Sensors, **23**, 9215 (2023). DOI: 10.3390/s23229215