

УДК 539.3

О ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

© 2020 г. И. В. Смирнов^{1,*}, член-корреспондент РАН Ю. В. Петров^{1,2}

Поступило 21.03.2020 г.

После доработки 21.03.2020 г.

Принято к публикации 05.04.2020 г.

В задачах высокоскоростного нагружения нестабильное поведение общепринятых прочностных характеристик материала существенно затрудняет оценку динамической прочности материала. В работе обнаружен новый эффект, который в ряде практически важных случаев испытаний с контролируемой скоростью воздействия для оценки динамической прочности позволяет предложить удобную временную характеристику инкубационных процессов разрушения при высокоскоростных нагрузках. Показано, что рассматриваемая временная характеристика не зависит от скорости деформации или скорости приложения нагружения и может быть определена из общедоступных экспериментов. Это дает возможность ввести параметр материала, который может применяться для критериальных условий оценки прочности материала при высокоскоростных нагрузках, в том числе для расчета скоростной и временной зависимости критических напряжений разрушения.

Ключевые слова: динамическая прочность, высокоскоростная деформация, инкубационные процессы, время до разрушения, критерии прочности

DOI: 10.31857/S2686740020030104

С развитием техники все чаще возникает вопрос о прогнозе влияния высокоскоростных и ударных нагрузок на прочность материалов и конструкций. Большое количество работ свидетельствуют о влиянии скорости деформации на критические напряжения разрушения [1, 2] или пластического течения [3, 4]. Из-за нестабильного поведения прочностных характеристик нельзя применить устоявшийся подход к оценке прочности материала [2, 5], который основан на представлении о постоянном значении критического напряжения разрушения или пластического течения. Таким образом, существует острая необходимость выявления характеристик прочности материала, которые не зависят от истории и способа приложения нагрузки.

В данной работе рассматривается экспериментально определяемая временная характеристика, которая не зависит от скорости воздействия и может использоваться для оценки инкубационных процессов в структуре материала, предшествующих началу макроразрушения.

Рассмотрим случай одноосного сжатия или раскалывания, когда разрушение начинается на стадии роста нагрузки без выраженной остаточной деформации. При этом под фактом, свидетельствующем о начале разрушения, будем понимать начало снижения напряжений на диаграмме “напряжение–время” или “напряжение–деформация”. В таком случае за прочность материала принимается максимум напряжения. Рассматриваемая ситуация типична для горных пород, бетона, керамики и других хрупких и квазихрупких материалов. При этом хорошо известен факт, что увеличение скорости деформации (напряжения) приводит к изменению напряжения разрушения. Поэтому скорость деформации регламентирована для стандартных или отраслевых испытаний.

В экспериментах обычно регистрируется изменение прикладываемой силы (напряжения) и деформации, а также время до начала спада нагрузки, т.е. время до разрушения. Поскольку разрушающее напряжение соответствует участку нагружения, который может рассматриваться как линейный, то для разрушающего напряжения σ_{cr} справедливо выражение:

$$\sigma_{cr} = E\dot{\epsilon}t_{cr}, \quad t_{cr} > 0, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации и t_{cr} – время до начала разрушения. Поскольку увеличение скорости деформации приводит к

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: i.v.smirnov@spbu.ru

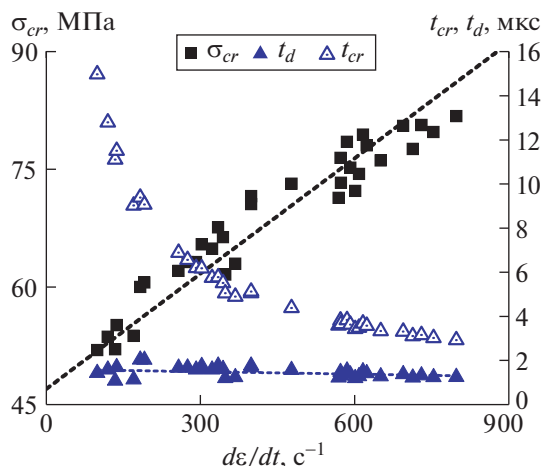


Рис. 1. Скоростная зависимость критических напряжений σ_{cr} , времени до начала разрушения t_{cr} и параметра t_d при высокоскоростном сжатии цемента. Экспериментальные данные из работы [6]. $t_d = 1.4$ мкс.

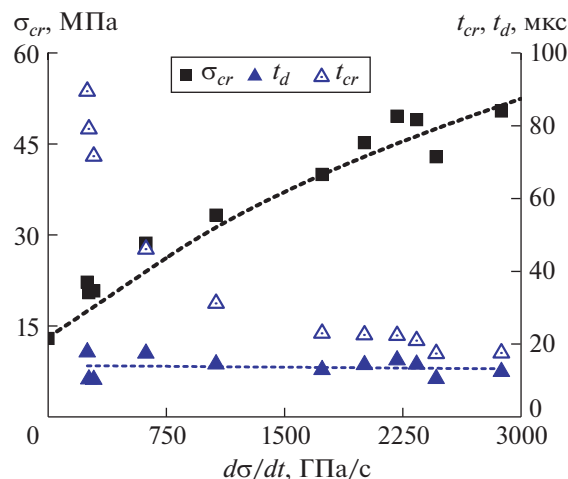


Рис. 2. Скоростная зависимость критических напряжений σ_{cr} , времени до начала разрушения t_{cr} и параметра t_d при высокоскоростном раскалывании гранита. Экспериментальные данные из работы [7]. $t_d = 15$ мкс.

увеличению разрушающего напряжения относительно квазистатической прочности материала σ_{st} , то выражение (1) можно переписать для двух слагаемых

$$\sigma_{cr} = \sigma_{st} + E\dot{\epsilon}t_d, \quad t_{st} + t_d > 0, \quad (2)$$

где t_d – время от момента достижения квазистатической прочности материала t_{st} до момента фактического разрушающего напряжения t_{cr} . Поскольку остальные компоненты из выражения (2) могут быть получены напрямую из эксперимента, то нетрудно определить время, которое характеризует динамику микропроцессов в структуре материала после достижения квазистатической прочности материала при скорости деформации выше квазистатического диапазона (когда $\sigma_{cr} > \sigma_{st}$):

$$t_d = \frac{\sigma_{cr} - \sigma_{st}}{E\dot{\epsilon}}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены результаты расчетов по экспериментальным данным из работы [6] по сжатию цемента. Результаты показывают, что с учетом разброса экспериментальных точек время t_d может быть принято постоянным.

Понятно, что функция (2) является линейной функцией с угловым коэффициентом $k = Et_d$ и показателем пересечения с осью ординат $b = \sigma_{st}$. Однако при таком разложении функции (1) угловой коэффициент приобретает смысл характерного параметра инкубационных процессов в структуре материала после достижения квазистатической прочности материала σ_{st} . При этом в пределах экспериментальных данных, доступных на сегодняшний день (см., например, [2]), разрушение начинается только спустя определенное время t_d независимо от скорости деформации.

Рассмотрим величину силового импульса, который был приложен к образцу за время t_{cr} . Учитывая результаты расчетов данных из работы [6] по формуле (2), для привязки к постоянной величине возьмем случай, когда $t_{cr} = 2t_d$, где t_d – константа. Тогда, согласно формулам площади трапеции и площади треугольника, получаем, что $\sigma_{cr}t_d = 2\sigma_{st}t_d$ или $\sigma_{cr} = 2\sigma_{st}$. Таким образом, можно предположить, что при условии $t_{cr} \leq 2t_d$ любой разрушающий импульс должен быть не менее $2\sigma_{st}t_d$. Исходя из этого предположения, получаем выражение для разрушающего напряжения $\sigma_{cr} = \frac{4\sigma_{st}t_d}{t_{cr}}$.

Чтобы связать полученное выражение со скоростью деформации, используем выражение (1), тогда

$$\sigma_{cr} = \sqrt{4E\sigma_{st}t_d\dot{\epsilon}}, \quad t_{cr} \leq 2t_d. \quad (4)$$

Из выражения (4) можно получить значение для времени t_d . Пример таких расчетов показан на рис. 2 по экспериментальным данным [7] для случая раскалывания гранита. Как и для примера на рис. 1, время t_d может быть принято постоянной величиной. При этом для случая $\sigma_{cr} < 2\sigma_{st}$ время t_d определялось по формуле (3), а для $\sigma_{cr} \geq 2\sigma_{st}$ из формулы (4).

Важно заметить, несмотря на использование одних и тех же обозначений параметров для двух различных схем испытаний, они должны трактоваться в зависимости от задачи как параметры либо при сжатии, либо при растяжении. При этом такое упрощение принято не только, чтобы исключить большое количество обозначений, но и показать общность полученного эффекта для различных испытаний.

Таким образом, экспериментальные данные дают основание рассматривать характерное время инкубационных процессов разрушения t_d постоянной величиной. Тогда уравнения (2) и (4) предполагают выражения для расчета критических напряжений, когда время до разрушения больше, чем характерное время ($t_{cr} > 2t_d$), и меньше, чем характерное время ($t_{cr} \leq 2t_d$). При этом характерное время $2t_d$ может рассматриваться как константа материала. Эти уравнения могут быть использованы для практических расчетов, а характерное время инкубационных процессов t_d может быть использовано для критериальных условий в структурно-временных подходах к анализу разрушения. Одним из наиболее близких примеров является критерий инкубационного времени [8]. Данный критерий может быть представлен следующим выражением:

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \geq \sigma_{st} \tau, \quad (5)$$

где $\sigma(t)$ — профиль напряжений в месте разрушения, σ_{st} — статическая прочность, которая может трактоваться (в зависимости от задачи) как прочность на сжатие или прочность на растяжение, τ — инкубационное время разрушения, также трактуемое отдельно для сжатия и растяжения. Таким образом, чтобы произошло разрушение, нужно накопить величину силового импульса не менее $\sigma_{st} \tau$ за время $t \leq \tau$ (при $t < 0$ $\sigma(t) = 0$). При этом предполагается, что инкубационное время может использоваться как параметр динамической прочности материала. Подставляя (1) в (5), можно получить простые соотношения для расчета разрушающих напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_{cr} = \sigma_{st} + 0.5E\dot{\epsilon}\tau, & t_{ct} > \tau, \\ \sigma_{cr} = \sqrt{2E\sigma_{st}\tau\dot{\epsilon}}, & t_{cr} \leq \tau. \end{cases} \quad (6)$$

При подстановке $\tau = 2t_d$ выражения в (6) соответствуют выражениям (2) и (4) (для случая (2) нужно полагать $t_{st} > t_d$). На рис. 1 и 2 показаны расчетные кривые скоростной зависимости критических напряжений, полученные по формулам (6) с помощью параметра τ , определенного по постоянным значениям t_d .

Подход инкубационного времени хорошо зарекомендовал себя при решении различных задач механики разрушения [8–10]. Одним из ключевых вопросов остается проблема быстрого и эффективного определения из эксперимента инкубационного времени разрушения, которое, по существу, и является мерой динамической прочности материала на заданном масштабном уровне. Полученный результат показывает, что в ряде случаев при простом нагружении с контролируемой скоростью воздействия оценка динамической прочности материала может быть сведена к определению t_d .

Отметим, что приведенные выше рассуждения могут быть применены и для случая скоростной зависимости предела текучести [10].

Таким образом, в работе показана временная характеристика инкубационных процессов разрушения, которая не зависит от скорости деформации или нагружения и может быть определена из общедоступных экспериментов. В связи с этим данная характеристика может рассматриваться как параметр материала и применяться для критериальных условий оценки прочности материала, например, критерия инкубационного времени.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 18–79–00193.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yoo D.-Y., Banthia N.* Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review // *Cement and Concrete Composites*. 2019. V. 104. № 103389. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389>
2. *Zhao J., Li J.* *Rock Dynamics and Applications – State of the Art*. CRC Press, 2013. 632 p.
3. *Madivala M., Bleck W.* Strain Rate Dependent Mechanical Properties of TWIP Steel // *JOM*. 2019. V. 71. P. 1291–1302. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3137-0>
4. *Bobbili R., Madhu V., Gogia A.K.* Tensile behaviour of aluminium 7017 alloy at various temperatures and strain rates // *J. Materials Research and Technology*. 2016. V. 5. № 2. P. 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.12.002>
5. *Morozov N., Petrov Y.* *Dynamics of Fracture*. Springer; 2000. 98 p.
6. *Klepaczko J.R.* Behavior of rock-like materials at high strain rates in compression // *Intern. J. Plasticity*. 1990. V. 6. № 4. P. 415–432. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(90\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0749-6419(90)90011-3)
7. *Dai F., Xia K., Tang L.* Rate dependence of the flexural tensile strength of Laurentian granite // *Intern. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010. V. 47. № 3. P. 469–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.05.001>
8. *Петров Ю.В.* Критерий инкубационного времени и импульсная прочность сплошных сред: разрушение, кавитация, электрический пробой // *ДАН*. 2004. Т. 395. № 5. С.621–625.
9. *Bratov V.A., Kazarinov N.A.* Dynamic fracture of ceramic plates due to impact loading. Numerical investigation // *Materials Physics and Mechanics*. 2019. V. 42. № 4. P. 389–395. https://doi.org/10.18720/MPM.4242019_3
10. *Бородин И.Н., Майер А.Е., Петров Ю.В., Груздков А.А.* Максимум предела текучести при квазистатической и высокоскоростной пластической деформации металлов // *ФТТ*. 2014. №12. С. 2384–2393.

ON TEMPORAL CHARACTERISTICS OF FAILURE IN HIGH-SPEED TESTS

I. V. Smirnov^a and Corresponding Member of the RAS Yu. V. Petrov^{a,b}

^a *Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation*

^b *Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

The unstable behavior of generally accepted strength characteristics of a material makes it difficult to evaluate the dynamic strength of a material in high-speed loading problems. The work reveals a new effect, which in a number of practically important cases of tests with a controlled loading rate for evaluating the dynamic strength allows us to offer a convenient time characteristic of the incubation processes of failure under high speed loads. It is shown that this time characteristic does not depend on the strain rate or loading rate and can be determined from general experiments. This makes it possible to enter a material parameter that can be used for criteria for evaluating the strength of a material under high-speed loads, including for calculating the rate and time dependence of critical failure stresses.

Keywords: dynamic strength, high strain rate, incubation processes, time to failure, strength criteria