

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Фундаментальная математика и механика

Механика деформируемого твердого тела

Сухов Владимир Дмитриевич

Аномальные эффекты скоростной
зависимости прочности при откольном
разрушении

Дипломная работа

Научный руководитель:
чл.-корр. РАН, проф., д. ф.-м. н. Петров Юрий Викторович

Рецензент:
д. ф.-м. н., в.н.с., Груздков Алексей Андреевич

Санкт-Петербург

2018

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Fundamental Mathematics and Mechanics

Mechanics of Deformable Solid Body

Sukhov Vladimir Dmitrievich

Anomalous effects of rate dependences of
strength in spall fracture

Graduation Thesis

Scientific supervisor:
Cor. Mem. of RAS, Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.) Yuri V. Petrov

Reviewer:
Lead. Res., Dr. Sci. (Phys.-Math.) Alexey A. Gruzdkov

Saint-Petersburg

2018

Содержание

Введение	4
Предельная динамическая прочность	5
Цель и методы исследования	6
Научная новизна и практическая ценность	6
1 Структурно-временной критерий	8
1.1 Определение инкубационного времени	9
2 Анализ динамической прочности бетона	11
2.1 Характеристики нагружающих импульсов при разрушении бетона по схеме Гопкинсона - Кольского	11
2.2 Скоростная зависимость прочности	13
2.3 Откольное разрушение	15
2.4 Эксперименты по отколу в бетоне	17
3 Механизм возникновения эффекта стабилизации скорост- ной зависимости прочности	20
3.1 Откольное разрушение при фиксированной амплитуде им- пульса напряжений	20
4 Заключение	22
Список литературы	23

Введение

В настоящее время, одним из наиболее актуальных направлений в механике сплошной среды является исследование поведения материалов, находящихся в экстремальных условиях. Одним из таких направлений является изучение механических характеристик материала при воздействии на него сверхкороткими импульсами напряжения.

Первые исследования на эту тему продемонстрировали, что прочность материала не является постоянной величиной и растёт при увеличении скорости деформации. Необходимо уметь давать качественный прогноз для таких явлений. Так, например, знание о поведении механических конструкций в условиях ударно-волнового нагружения, позволит избежать их внезапного обрушения. С другой стороны, высокоскоростное нагружение может способствовать развитию более эффективных методов добычи полезных ископаемых.

Всё это говорит о том, что важно уметь предсказывать поведение материалов в широком диапазоне скоростей деформаций, поэтому существуют различные подходы для осуществления таких исследований. Изучение процесса разрушения на низких скоростях деформаций, порядка $10^{-6} - 10^0 \text{ с}^{-1}$, осуществляют с помощью гидравлических машин. Затем проводят эксперименты по схеме Гопкинсона-Кольского в диапазоне скоростей от 10^1 до 10^4 с^{-1} . Достижение скоростей деформаций в интервале от 10^4 до 10^6 с^{-1} можно осуществить при проведении экспериментов на откол. Этот подход базируется на рассмотрении волновых процессов, протекающих в исследуемом материале. Сначала в образце возбуждают волну сжатия, которая, отражаясь от свободной поверхности, меняет знак и преобразуется в волну растяжения. Комбинация волн, достигнув критического растягивающего значения, способна вызвать откол части образца вблизи свободной поверхности.

Для анализа процесса разрушения необходимо иметь критерии, которые достаточно полно описывают явления, наблюдаемые в экспериментах. На данный момент существуют множество различных динамических критериев разрушения [1]. Анализ откольного разрушения в работе проводится с помощью структурно-временного критерия [2,3]. Преимуществами данного подхода является относительная простота, в совокупности с возможно-

стью прогнозирования множества эффектов, характерных для конкретного вида динамического воздействия.

В ряде работ [4], по анализу зависимости прочности от скорости деформаций, наблюдается эффект стабилизации прочности. Выражается это в том, что при превышении некоторого значения скорости деформации динамическая прочность перестаёт изменяться. Некоторыми исследователями данный эффект трактуется, как достижение “пределной динамической” прочности материала. Такой подход неверен вследствие сильной неравновесности динамического процесса. Использование структурно-временного подхода позволяет рассчитывать скоростную зависимость прочности и объяснять её стабилизацию. Этот подход был успешно применен для объяснения наличия стабилизации прочности у алюминия, в случае откольного разрушения при воздействии лазерным излучением на образец [5].

Скоростная зависимость динамической прочности

В работе [4] приведены материалы для которых при превышении некоторой скорости деформации, критическое значение напряжений перестаёт существенно изменяться. Авторы работы предлагают рассматривать три области для скорости деформирования (см. рис. 1).

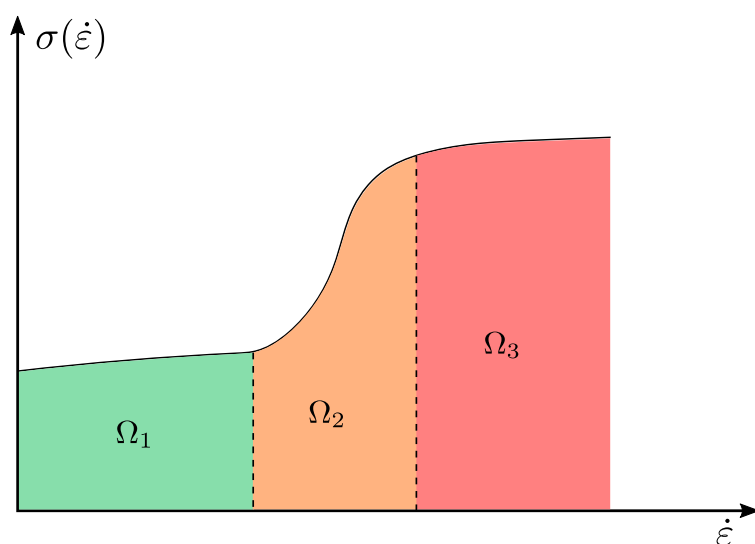


Рис. 1: Зависимость динамической прочности от скорости деформации.

Области Ω_1 и Ω_3 характеризуются слабой зависимостью от скорости деформации, а Ω_2 соответствует участку с высокой чувствительностью к скорости деформирования.

Данный эффект наблюдается для различных материалов. К ним относятся металлы [6–9], полимеры [10, 11], хрупкие материалы [12] и т.д. На рисунке 2 приведены примеры для стали [6] и карбида кремния [12]. Наблюдение стабилизации прочности в большинстве случаев происходит при проведении экспериментов на откол.

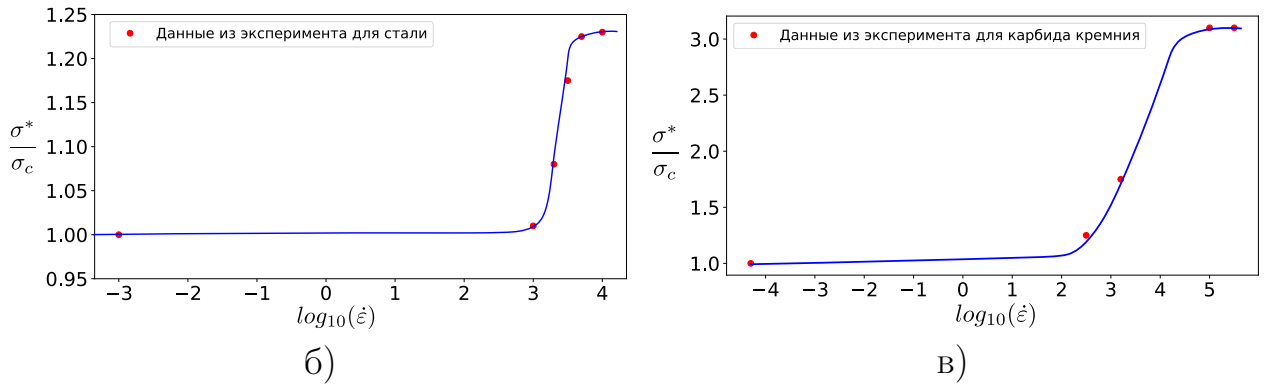


Рис. 2: Зависимость динамической прочности от скорости деформации для некоторых материалов.

Цель и методы исследования

Целью настоящей работы является исследование зависимости предельных напряжений от скорости деформирования, а также объяснение явления стабилизации динамической прочности. Для построения модели, позволяющей описывать разрушение материалов в широком диапазоне скоростей деформации, применяется структурно-временной критерий. Данный критерий зарекомендовал себя в качестве удобного и практичного средства для описания квазистатического процесса разрушения, а также сверхбыстрого динамического [13–15]. При проведении расчетов использовались специально разработанные программы на языке Python.

Научная новизна и практическая ценность

Структурно-временной подход позволяет рассчитывать прочностные характеристики исследуемых материалов при квазистатическом и ударно-волновом видах нагружения. Применение структурно-временного критерия не требует задействования огромных вычислительных средств, следо-

вательно может быть использовано повсеместно для расчета прочностных характеристик материалов.

В работе приведены схемы, позволяющие определять критические напряжения в широком диапазоне скоростей деформаций. Проведен анализ динамической прочности бетона. Исследованы характерные особенности разрушения для нагружающих импульсов, которые могут быть аппроксимированы кусочно-линейной функцией в виде треугольника.

Полученные результаты, могут быть полезны при решении таких инженерных задач, как расчет конструкций в условиях ударно-волнового воздействия на них, а также проектирование сооружений в областях, подверженных частым сейсмическим активностям.

1 Структурно-временной критерий

Анализ экспериментальных данных по разрушению материалов при высокоскоростных, ударно-волновых видах нагружения показал несовершенство традиционных квазистатических критериев разрушения. Согласно классическому критерию критического напряжения ($\max_t \sigma(t) \leq \sigma_c$, σ_c - квазистатический предел прочности), считается, что разрушение происходит мгновенно при превышении σ_c . Однако, результаты высокоскоростных экспериментов продемонстрировали, что критическое напряжение не является постоянной величиной и зависит от параметров прикладываемого импульса. Это делает невозможным экстраполирование квазистатических подходов на область динамических воздействий. В связи с этим, в настоящее время разработаны альтернативные подходы, которые позволяют прогнозировать поведение материалов в условиях сверхкоротких импульсных воздействий. К ним относится структурно-временной подход.

Для моделирования поведения прочностных характеристик материалов будем пользоваться структурно-временным критерием, который был предложен в [13–15]. Этот критерий основан на наборе инвариантных относительно истории нагружения параметров и может быть сформулирован в следующем виде:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{F(\xi)}{F_c} d\xi \leq 1, \quad (1)$$

где $F(\xi)$ - интенсивность местного силового поля, вызывающего разрушение материала, F_c - квазистатический предел локального силового поля, τ - инкубационное время, которое отвечает за предварительные процессы, протекающие в теле перед образованием макроразрушения. Первый момент времени при котором неравенство (1) обращается в равенство соответствует времени разрушения t^* .

Ключевой особенностью используемого подхода является введение инкубационного времени в качестве характеристики динамической прочности материала. Параметр инкубационного времени τ является инвариантным по отношению к истории нагружения. Таким образом, набор параметров (F_c, τ) позволяет моделировать процесс разрушения.

Для бездефектных сред критерий (1) может быть переформулирован

следующим образом

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(\xi) d\xi \leq \sigma_c \tau. \quad (2)$$

Здесь в качестве интенсивности силового поля $F(\xi)$ взято напряжение $\sigma(\xi)$, действующее в образце.

Применение структурно-временного подхода даёт возможность объяснить явления, характерные для динамических испытаний [16–18]. Сюда относится эффект “задержки разрушения”. Он заключается в том, что разрушение может происходить после достижения максимума напряжений (см. рис. 3). Данное явление соответствует основной идеи критерия инкубационного времени, которое заключается в том, что до образования разрушения в материале протекают подготовительные (инкубационные) процессы. Тем самым, возникновение разрушения характеризуется не мгновенным значением напряжения, а импульсом напряжений.

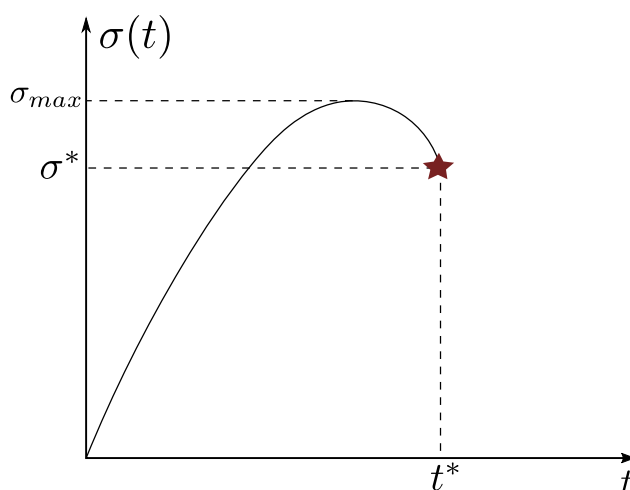


Рис. 3: Явление “задержки разрушения”, t^* - время разрушения, σ^* - напряжение в момент разрушения.

1.1 Определение инкубационного времени

Подготовительные процессы, протекающие в материале перед разрушением, являются важными и имеют место как при квазистатических, так и при быстрых, ударных воздействиях. В качестве одной из простейших интерпретаций инкубационного времени рассмотрим случай, когда разрушение происходит при медленном ($t^* \gg \tau$), линейном росте растягивающих

напряжений

$$\sigma(t) = \dot{\sigma} \cdot t \cdot H(t),$$

где $\dot{\sigma} = const$ - скорость роста напряжений, $H(t)$ - функция Хевисайда. Подставляя выражение для $\sigma(t)$ в (2) получаем, что время разрушения $t^* = \sigma_c/\dot{\sigma} + \tau/2$ и критическое напряжение в момент разрушения $\sigma^* = \sigma(t^*) = \sigma_c + (\dot{\sigma}\tau)/2$. При достаточно медленном воздействии $(\dot{\sigma}\tau)/\sigma_c \ll 1$, напряжение в момент разрушения не существенно отличается от квазистатического предела прочности, то есть $\sigma^* \approx \sigma_c$. Квазистатический предел прочности достигается в момент времени $t_c = \sigma_c/\dot{\sigma}$. В таком случае инкубационное время можно определить из следующего выражения (см. рис. 4)

$$\tau = 2 \cdot (t^* - t_c)$$

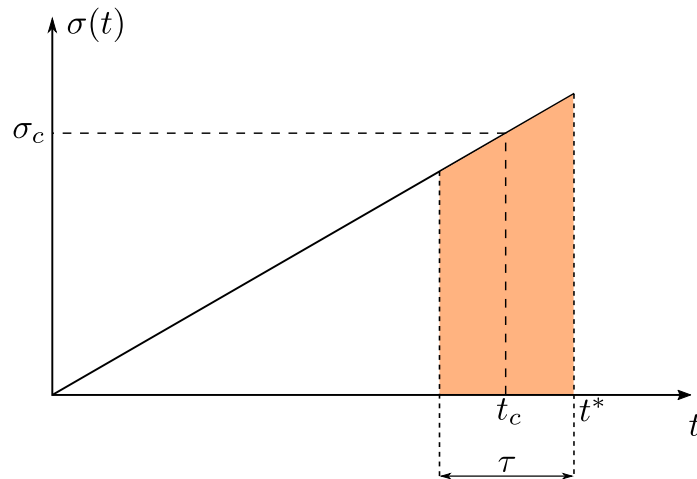


Рис. 4: Временная зависимость напряжений в случае медленного, линейного нагружения.

2 Анализ динамической прочности бетона

Исследуем динамическую прочность бетона при помощи структурно-временного критерия. В качестве инкубационного времени разрушения для бетона примем $\tau = 70$ мкс. Данные по скоростной зависимости предельных напряжений получены из работ [19, 20]. Часть экспериментов проводилась на базе схемы Гопкинсона - Кольского, а в других проводились эксперименты по отколу.

2.1 Характеристики нагружающих импульсов при разрушении бетона по схеме Гопкинсона - Кольского

При изучении разрушения материала по схеме Гопкинсона - Кольского образец располагают между двумя длинными стержнями, которые имеют предел текучести больший, чем у образца. Затем происходит воздействие на систему из стержней и образца нагружающим импульсом. Данные о характеристиках импульса получают на основе тензодатчиков, закрепленных на стержнях. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5. Для исследования материалов на растяжение, образцы изготавливают в виде гантелей [21]. Для предотвращения воздействия со стороны исходной волны сжатия на образец, между стержнями устанавливают передающую шайбу. Волна сжатия, достигнув свободной поверхности “выходного стержня”, сменяется на волну растяжения. Затем она доходит до образца и деформирует его.



Рис. 5: Разрезной стержень Гопкинсона - Кольского [22].

В экспериментах использовались образцы, выполненные из бетона. Параметры исследуемого материала сведены в таблицу 1.

Импульс измеренный на основе тензодатчиков приведен на рисунке 6

Таблица 1: Параметры исследуемого бетона.

Параметр	Значение
Модуль Юнга, E	$38.9 \cdot 10^9$ Па
Квазистатическая прочность, σ_c	$3.5 \cdot 10^6$ Па
Коэффициент Пуассона, ν	0.17
Плотность, ρ	2300 кг/м ³

а). Будем рассматривать аппроксимацию исходного импульса в виде «треугольника», заданного кусочно-линейной функцией (рис. 6 б).

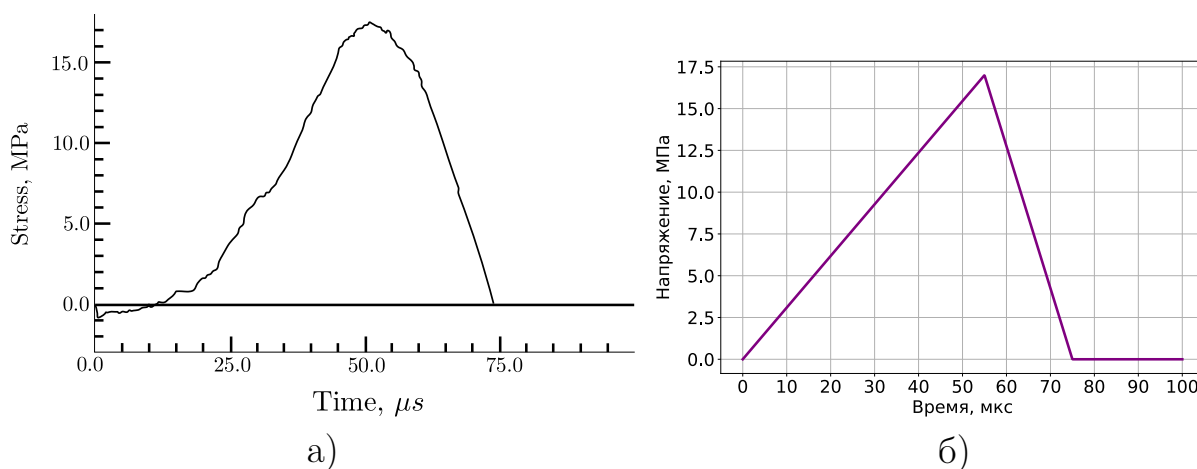


Рис. 6: Временные профили импульсов, а) - импульс из эксперимента, б) - кусочно-линейная аппроксимация.

В таком случае временной профиль напряжений для аппроксимированного импульса задается следующим выражением

$$\sigma(t) = \frac{A \cdot t}{T_1} \cdot [H(t) - H(t - T_1)] + \frac{A \cdot (t - T_2)}{T_1 - T_2} \cdot [H(t - T_1) - H(t - T_2)], \quad (3)$$

где A - амплитуда импульса, T_1 - продолжительность участка роста напряжений, T_2 - общая продолжительность импульса, $H(t)$ - ступенчатая функция Хевисайда.

Исследуем возможность образования разрушения на участке нарастания напряжений. Для этого рассмотрим характерный импульс, полученный в эксперименте (см. рис 6). Его амплитуда $A = 17$ МПа, а продолжительность участка роста $T_1 = 55$ мкс. Возникновение разрушения на участке роста напряжений возможно при выполнении критерия (2) для интервала времени $[0 \text{ мкс}, 55 \text{ мкс}]$ (см. рис 7). В случае исследуемого импульса можно

показать, что

$$\int_0^{55} \sigma(t) dt = 467.5 > \sigma_c \cdot \tau = 245,$$

следовательно, согласно структурно-временному критерию, разрушение происходит на участке нарастания значений напряжения. Можно считать, что для всех импульсов разрушение происходит при росте напряжения, так как они имеют мало отличающиеся продолжительности участков роста напряжения при этом обладают большей амплитудой. В таком случае дальнейшее моделирование динамической прочности бетона для экспериментов по схеме Кольского - Гопкинсона можно проводить, рассматривая лишь первое слагаемое в (3).

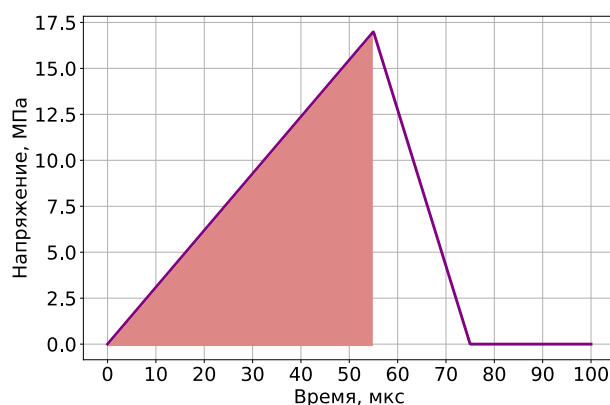


Рис. 7: Импульс напряжения.

2.2 Скоростная зависимость прочности

Опираясь на рассуждения, приведенные в пункте 2.1, достаточно рассматривать лишь участок нарастания напряжений, то есть

$$\sigma(t) = \frac{A \cdot t}{T_1} \cdot [H(t) - H(t - T_1)]. \quad (4)$$

Подставляя выражение для $\sigma(t)$ в структурно-временной критерий [23],

получаем что

$$\frac{A_*}{\sigma_c} = \begin{cases} \frac{2T_1}{2T_1 - \tau}, & T_1 \geq \tau, \\ \frac{2\tau}{T_1}, & T_1 \leq \tau, \end{cases} \quad (5)$$

где A_* - критическое напряжение, вызывающее разрушение.

Будем считать, что выполняется закон Гука, тогда $\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t)$, где E - модуль Юнга. Дифференцируя закон Гука и (4) по времени можно получить выражение для напряжений через скорость деформирования

$$\sigma(t) = E \dot{\varepsilon} t \cdot [H(t) - H(t - T_1)],$$

при этом скорость деформации связана с амплитудой и продолжительностью следующим образом:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{A}{ET_1}. \quad (6)$$

Выразим продолжительность T_1 из (5) и подставим в (6), тем самым получим, что

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} \frac{A_*^2}{2E\sigma_c\tau}, & \frac{A_*}{\sigma_c} \geq 2, \\ \frac{2 \cdot (A_* - \sigma_c)}{E\tau}, & 1 \leq \frac{A_*}{\sigma_c} \leq 2, \end{cases}$$

или

$$\frac{A_*}{\sigma_c} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E\dot{\varepsilon}\tau}{\sigma_c}}, & \frac{E\dot{\varepsilon}\tau}{\sigma_c} \geq 2, \\ \frac{E\dot{\varepsilon}\tau}{2\sigma_c} + 1, & 0 \leq \frac{E\dot{\varepsilon}\tau}{\sigma_c} \leq 2. \end{cases} \quad (7)$$

Полученное соотношение (7) позволяет прогнозировать возникновение разрушения в случае, когда нет влияния отраженных волн. При этом оно включает в себя как область квазистатического нагружения, так и динамическую область.

На рисунке 8 представлена вычисленная зависимость A_*/σ_c от скорости деформирования из соотношения (7). На основании графика можно видеть, что структурно-временной критерий позволяет прогнозировать

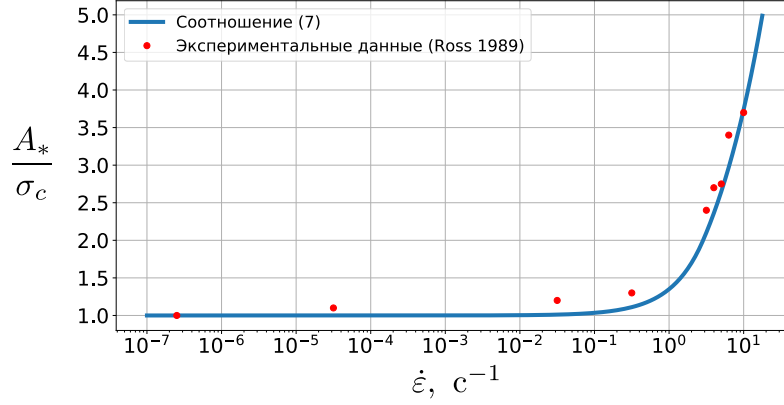


Рис. 8: Зависимость A_*/σ_c от $\dot{\epsilon}$.

возникновения разрушения как в области низких скоростей деформаций ($\dot{\epsilon} \sim 10^{-6} \text{ c}^{-1}$), так и в области с высокой чувствительностью к изменению скорости деформирования ($\dot{\epsilon} \sim [10^0 \text{ c}^{-1} - 10^1 \text{ c}^{-1}]$).

2.3 Откольное разрушение

Рассмотрим образец длины L , по которому производят воздействие ударником. На рисунке 9 приведена классическая схема экспериментов по откольному разрушению.

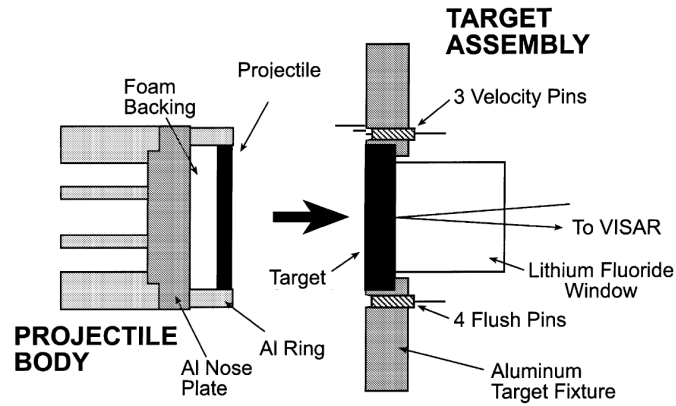


Рис. 9: Конфигурация эксперимента [12].

Будем рассматривать одномерную постановку задачи. В таком случае для образца будет выполнено уравнение движения:

$$\frac{\partial \sigma(x, t)}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2},$$

где ρ - плотность материала, $\sigma(x, t)$, и $u(x, t)$ - напряжение и перемещение соответственно для сечения с координатой x в момент времени t . Дифференцированием по координате x и, учитывая, что $\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$ (E - модуль Юнга), можем прийти к следующему волновому уравнению с начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2}; \\ \sigma(0, t) = -A \cdot f(t), \quad \sigma(L, t) = 0; \\ \sigma(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t}(x, 0) = 0, \end{cases}$$

где $f(t)$ - временной профиль напряжений, A - амплитуда профиля напряжений, $c = \sqrt{E/\rho}$ - скорость звука для рассматриваемого материала. Решение волнового уравнения, согласно методу распространяющихся волн [24], будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma(x, t) = - \sum_{n=0}^{\infty} \left[A \cdot f \left(t - \frac{2nL}{c} - \frac{x}{c} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A \cdot f \left(t - \frac{2nL}{c} + \frac{x}{c} \right) \right],$$

где, первый ряд соответствует волнам сжатия, а второй волнам растяжения. В случае откола, интерес представляют исходная волна сжатия и отраженная волна растяжения, так как последующие отражения не успевают внести свой вклад в отрыв части образца. Связано это с тем, что, при проведении экспериментов на откольное разрушение, длина импульса меньше характерного размера образца, то есть $c \cdot T < L$. Тогда

$$\sigma(x, t) = -A \cdot f \left(t - \frac{x}{c} \right) + A \cdot f \left(t - \frac{2L}{c} + \frac{x}{c} \right).$$

Далее положим, что нуль по x соответствует свободной поверхности, а время отсчитывается от момента прихода исходной волны сжатия на свободную поверхность. Для этого применим следующее преобразование координат:

$$\tilde{t} = t - \frac{L}{c}, \quad \tilde{x} = L - x. \quad (8)$$

В таком случае выражение для напряжений запишется так:

$$\sigma(\tilde{x}, \tilde{t}) = -A \cdot f\left(\tilde{t} + \frac{\tilde{x}}{c}\right) + A \cdot f\left(\tilde{t} - \frac{\tilde{x}}{c}\right).$$

2.4 Эксперименты по отколу в бетоне

Для реализации откольного разрушения в бетоне использовалась измененная схема Гопкинсона-Кольского [20] (см. рис. 10). Основными элементами установки являются ударник, «входной стержень», образец. Воздействие ударника возбуждает волну сжатия, которая движется вдоль стержня. На границе стержень-образец часть сигнала передается в образец. Волна сжатия, достигнув свободной поверхности образца, отражается волной растяжения. В результате, в некоторых сечениях суммарное значение напряжения может стать растягивающим, что способно привести к разрушению образца.

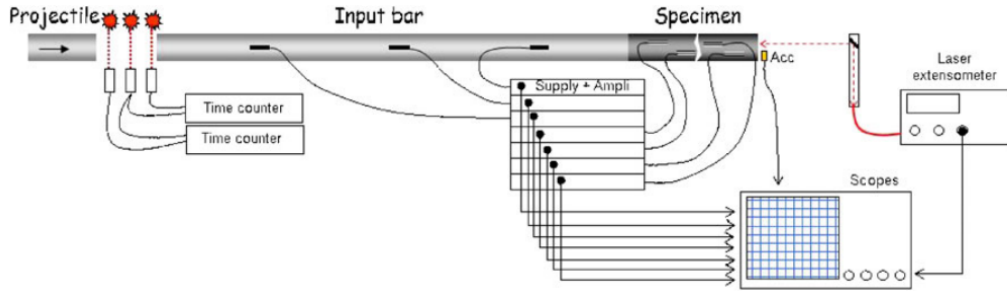


Рис. 10: Схема экспериментальной установки для реализации откольного разрушения. [20].

В эксперименте с помощью тензодатчиков измерялись напряжения, действующие во «входном стержне», а также применялась лазерная интерферометрия для определения скорости свободной поверхности образца. Пример измеренной скорости свободной поверхности приведен на рисунке 11.

По скорости свободной поверхности $v(t)$ можно восстановить напряжение, действующее в образце [18]. Для волн сжатия и растяжения будет выполнено

$$\sigma^{\text{inc}}(x, t) = -\frac{\rho c}{2} \cdot v\left(t + \frac{x}{c}\right), \quad \sigma^{\text{ref}}(x, t) = \frac{\rho c}{2} \cdot v\left(t - \frac{x}{c}\right).$$

Здесь $\sigma^{\text{inc}}(x, t)$ - волна сжатия, $\sigma^{\text{ref}}(x, t)$ - волна растяжения. Тогда общее

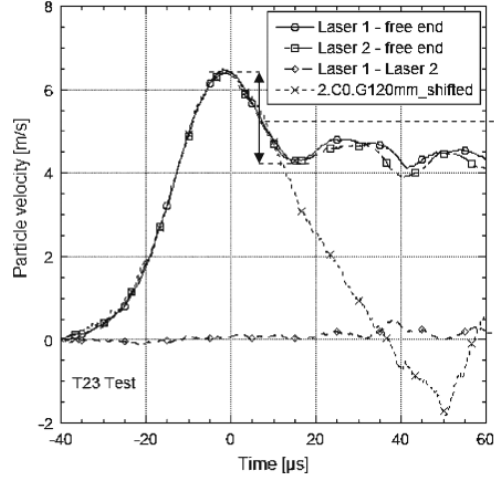


Рис. 11: Временной профиль скорости свободной поверхности [20].

напряжение в сечении с координатой x

$$\sigma(x, t) = \sigma^{\text{inc}}(x, t) + \sigma^{\text{ref}}(x, t) = \frac{\rho c}{2} \cdot \left[v \left(t - \frac{x}{c} \right) - v \left(t + \frac{x}{c} \right) \right]. \quad (9)$$

Рассмотрим кусочно-линейную аппроксимацию для скорости свободной поверхности, приведенной в работе [20], в следующем виде:

$$v(t) = \frac{v_a}{T_1} \cdot t \cdot [H(t) - H(t - T_1)] + \frac{v_a}{T_1 - T_2} \cdot (t - T_2) \cdot [H(t - T_1) - H(t - T_2)], \quad (10)$$

где v_a - максимальное значение скорости свободной поверхности, T_1 - продолжительность участка роста скорости, $T_2 - T_1$ - продолжительность участка спада скорости. Подставив (10) в (9), можно получить аппроксимированное выражение для напряжения $\sigma(x, t)$. Подстановка аппроксимированного импульса напряжений в структурно-временной критерий (2) позволяет найти сечение в котором впервые возникнет разрушение. Результаты численного моделирования приведены на рисунке (12). При расчете параметры импульсов такие, как амплитуда и продолжительность брались в соответствии с результатами, полученными в эксперименте [20].

Причиной возникновения явления стабилизации скоростной зависимости прочности является существование эффекта «задержки разрушения». Так разрушение может произойти в случае, когда суммарное напряжение в сечении x_0 , в течении некоторого времени не изменяется (см. рис 13). При этом, изменение параметров исходного импульса может существенно не повлиять на величину критического напряжения в момент разрушения,

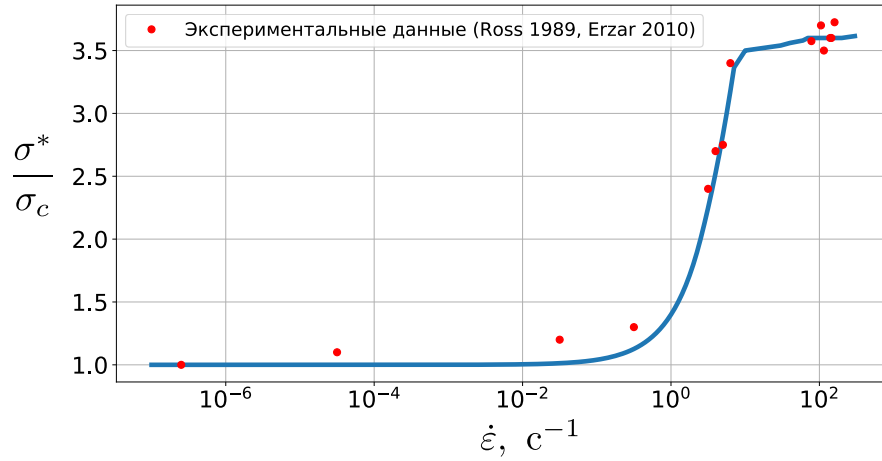


Рис. 12: Зависимость σ^*/σ_c от $\dot{\epsilon}$.

а лишь сменить место, в котором впервые выполнится условие критерия (2).

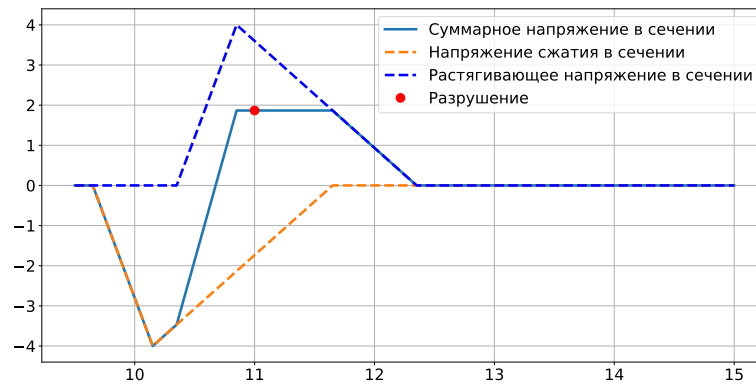


Рис. 13: Пример возникновения разрушения с задержкой.

3 Механизм возникновения эффекта стабилизации скоростной зависимости прочности

В рамках структурно-временного подхода рассмотрим частный случай возникновения откольного разрушения и покажем для него возможность наличия эффекта стабилизации скоростной зависимости прочности.

3.1 Откольное разрушение при фиксированной амплитуде импульса напряжений

Как и прежде, будем рассматривать напряжения, действующие в сечении образца, в следующем виде:

$$\sigma(x, t) = \sigma^{\text{inc}}(x, t) + \sigma^{\text{ref}}(x, t) = A \cdot \left[f\left(t - \frac{x}{c}\right) - f\left(t + \frac{x}{c}\right) \right],$$

где

$$f(\xi) = \frac{\xi}{T_1} \cdot [H(\xi) - H(\xi - T_1)] + \frac{\xi - T_2}{T_1 - T_2} \cdot [H(\xi - T_1) - H(\xi - T_2)].$$

В качестве выражения для скорости деформации растягивающего воздействия примем следующее

$$\dot{\epsilon} = \frac{A}{T_1 \cdot E},$$

тогда

$$\lim_{T_1 \rightarrow 0^+} \dot{\epsilon}(T_1) = +\infty.$$

Таким образом, при фиксированной амплитуде ($A = \text{const}$) за счёт уменьшения продолжительности T_1 можно получить сколь угодно большую скорость деформации. Рассмотрим предельный случай, когда $T_1 = 0$. Будем считать, что разрушение осуществилось в ситуации, когда суммарное напряжение в течение некоторого промежутка времени оставалось постоянным (см. рис. 14).

Численный расчет продемонстрировал, что при незначительном увеличении T_1 до определенного значения, критическое напряжение практически не изменяется. Затем величина критического напряжения начинает расти. Результаты расчетов приведены на рисунке 15.

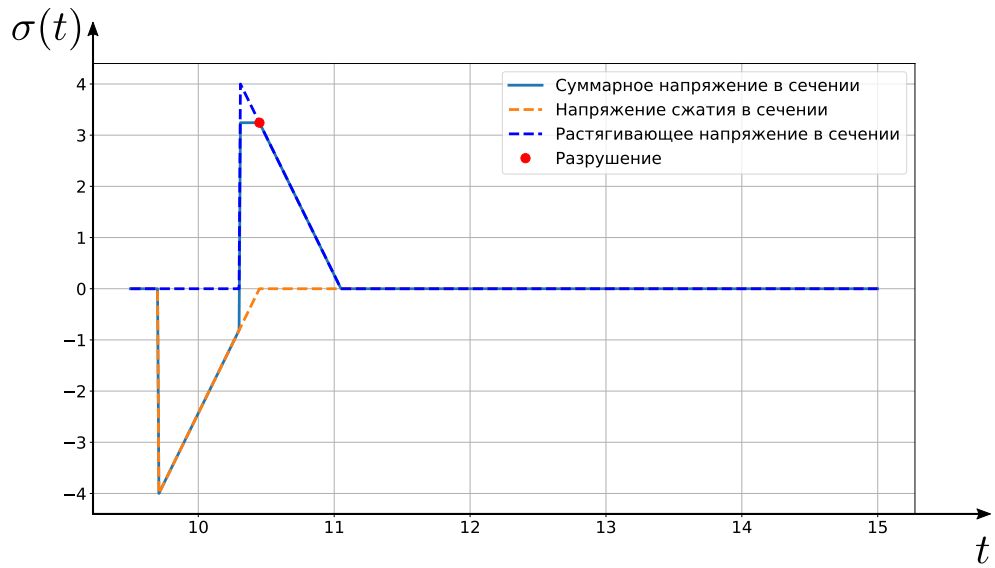


Рис. 14: Разрушения в случае $T_1 = 0$.

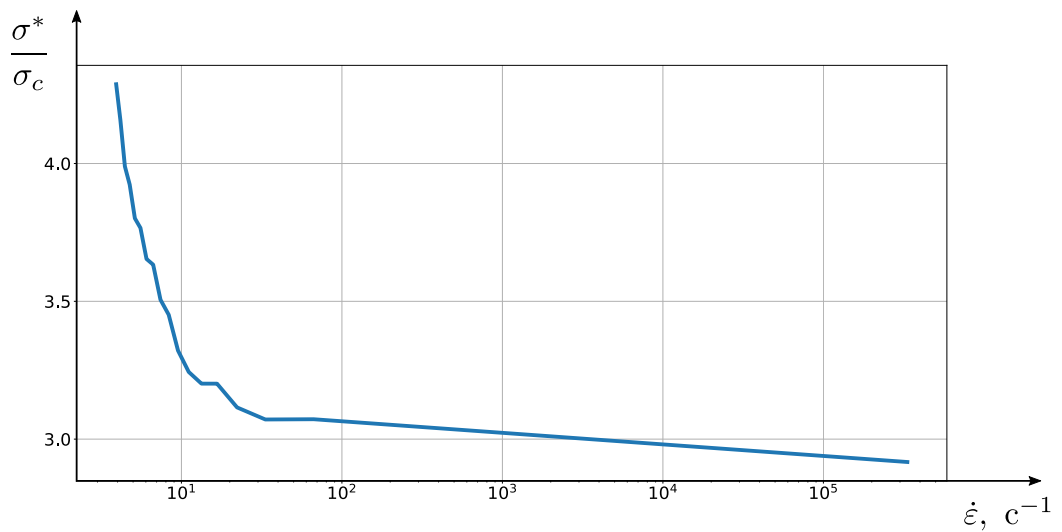


Рис. 15: Зависимость σ^*/σ_c от $\dot{\epsilon}$.

Таким образом, продемонстрировано, что в случае когда импульс напряжения имеет “резкий” участок роста последующее уменьшение продолжительности T_1 не приводит к значительному изменению критического напряжения. Тем самым показано наличие стабилизации откольной прочности при фиксированной амплитуде и малых значениях T_1 .

4 Заключение

В настоящей работе был исследован эффект стабилизации скоростной зависимости прочности. Рассмотрение аналитического решения одномерной волновой задачи с последующим применением структурно-временного критерия продемонстрировало, что явление стабилизации прочности является расчетной характеристикой. Таким образом, отпадает необходимость во введении “предельной динамической” прочности в качестве нового параметра материала.

Явление стабилизации скоростной зависимости прочности было исследовано на примере бетона. В результате была вычислена скоростная зависимость прочности в широком диапазоне скоростей деформации. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными из экспериментов.

Приведен пример откольного разрушения при фиксированной амплитуде, для которого при уменьшении продолжительности участка роста напряжений наблюдается, что критическое напряжение, вызывающее разрушение, практически перестаёт изменяться.

Для проведения расчетов были написаны программы на языке программирования Python. В их основу был положен критерий инкубационного времени. В случае откольного разрушения это позволяет определять критическое напряжение, время разрушения и соответствующее сечение образца.

Работа позволяет сделать вывод о том, что в случае высокоскоростных экспериментов основными параметрами характеризующими процесс разрушения являются амплитуда приложенного импульса, а также продолжительности участков роста и спада напряжений.

Практическая значимость исследования заключается в возможности прогнозирования поведения материалов в широком диапазоне скорости деформирования без задействования сверхмощных вычислительных средств. Рассмотрение проблемы разрушения с помощью структурно-временного подхода позволяет определить прочность материала для множества различных видов нагружения.

Список литературы

- [1] Dechun Lu, Guosheng Wang, Xiuli Du, et. al. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete. // International Journal of Impact Engineering. 2017. 103. P.124-137
- [2] Петров Ю.В. О квантовой природе динамического разрушения хрупких сред. // ДАН СССР. 1991. Т. 321. №1. С. 66-68
- [3] Petrov Yu. V. Quantum analogy in the mechanics of fracture solids. // Phys Solid State. 1996. 38. 1846-1850
- [4] Shui-sheng YU, Lu Yu-bin, CAI Young. The strain-rate effect of engineering materials and its unified model. // Latin American Journal of Solids and Structures. 2013. 10. 833-844.
- [5] Petrov Yu.V., Smirnov I.V., Utkin A.A. Effects of Strain-Rate Strength Dependence in Nanosecond Load Duration Range. // Mechanics of Solids. 2010. Vol. 45. No.3 P.476-484.
- [6] Zhang H., Suo T., Li Y.L. Mechanical behavior of stainless steel material at elevated temperatures and high strain rates. // Journal of Aeronautical Materials. 2012. 32. P.78-83.
- [7] Zhang L.S., Huang F.L., Duan Z.P., et al. The strain-rate effect of 7075Al yielding and a modified Johnson-Cook constitutive relation. // Proceedings of Ninth Material Dynamics Conference. 2011. P.143-148.
- [8] Batani D., Vovchenko V.I., Kanel G.I., et al. Mechanical Properties of a Material at Ultrahigh Strain Rates Induced by a Laser Shock Wave. // Doklady Physics. 2003. Vol.48. No.3. P.123-125
- [9] Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю., Фортов В.Е. Изучение теплофизических и механических свойств вещества в экстремальных условиях. // Квантовая электроника. 2003. 33. №7. С.593-608.
- [10] Hu W.J., Tang L.C., Zhang F.J., et al. Experimental study of polycarbonate's impact compression. // Polymer Materials Science and Engineering. 2006. 32. P.165-168.

- [11] Sato Y., Yoshida M., Nagayama K., et al. Stress-strain relationships of polycarbonate over a wide range of strain rate, including a shock wave regime. // International Journal of Impact Engineering. 2008. V.35. P.1778-1783.
- [12] Grady D.E. Dynamic Properties of Ceramic Material. // Sandia National Laboratories Report. 1995. P.1-99.
- [13] Petrov Yu.V., Utkin A.A. Dependence of the dynamic strength on loading rate. // Materials Science. 1989. V.25. N.2. P.153-156
- [14] Petrov Yu. V., Karihaloo B.L., Bratov V.V., et al. Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. // International Journal of Engineering Science. 2012. V.61. P.3-9.
- [15] Petrov Yu.V., Morozov N.F. On the Modeling of Fracture of Brittle Solids. // ASME Journal of Applied Mechanics. 61. P.710-712.
- [16] Петров Ю.В., Морозов В.А., Смирнов И.В., и др. Исследование эффекта электрического пробоя диэлектрика на участке спада импульса напряжений на основе подхода инкубационного времени. // ЖТФ. 2015. Т.85. Вып.12 С.1-5.
- [17] Volkov G.A., Petrov Yu.V., Utkin A.A. On Some Principal Features of Data Processing of Spall Fracture Tests. // Physics of the Solid State. 2017. V.59. No.2. P.310-315.
- [18] Михайлова Н.В., Волков Г.А., Мещеряков Ю.И., и др. Эффект задержки разрушения при разрушении стальных образцов в условиях откола. // ЖТФ. 2017. Т.87. Вып. 4. С.527-532.
- [19] Ross C. Split-Hopkinson Pressure Bar Tests. // Technical Report. FL: Air Force Engineering and Services Center Tyndall AFB. 1989. P.1-80.
- [20] Erzar B., Forquin P., An Experimental Method to Determine the Tensile Strength of Concrete at High Rates of Strain. // Experimental Mechanics. 2010. V.50. P.941-955.
- [21] Совиков М.А., Чудинов В.В., Ляпунова Е.А., и др. Экспериментальные исследования термодинамики динамического деформирования и балли-

стических закономерностей пробивания. // Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. С.113-123

- [22] Николаева Е.А. Особенности динамической калибровки стержня Гопкинсона - Кольского. // Математическое моделирование систем и процессов. 2003. № 11. С.87-93.
- [23] Уткин А.А., Петров Ю.В., Смирнов И.В. Структурно-временная теория откольного разрушения. // СПб: Политехника, 2016 - 55 С.
- [24] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. / Учеб. пособие. - 6-е изд. - М.: Изд-во МГУ, 1999 - 799 С.