

Санкт-Петербургский государственный университет

Фундаментальная математика и механика

Механика деформируемого твердого тела

Саргсян Владик Маратович



Особенности образования зон разрушения при отколе

Дипломная работа

Научный руководитель:

проф., докт. физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН Петров Ю.В.

Рецензент:

проф., докт. техн. наук Смирнов В.И.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Fundamental Mathematics and Mechanics

Mechanics of solid deformable body

Vladik Sargsian



Peculiarities of failure zone formation at spall fracture

Graduation Thesis

Scientific supervisor:

prof., member (corr.) of the RAS, PhD, D.Sci Yuri Petrov

Reviewer:

prof., PhD, D.Sci Vladimir Smirnov

Saint-Petersburg

2016

Оглавление	
Введение.....	4
1.Откольное явление	6
1.1 Постановка задачи откольного разрушения и ее решение	6
1.2 Описание эксперимента по отколу	9
2. Обработка экспериментальных данных и анализ результатов	11
2.1 Критерий инкубационного времени	11
2.2. Определение места и времени разрушения	12
Заключение	17
Литература	18

Введение

Исследование процессов разрушения материалов при воздействии кратковременных импульсных нагрузок представляет большой интерес в области прикладных задач. Наряду с традиционными направлениями, связанными с военной техникой и вооружением, такие исследования немаленькое имеют значение для эксплуатации и разработки современных конструкций. Развитие новых технологий с применением импульсных лазеров, взрыва и других импульсных источников энергии также имеет тесную связь с результатами экспериментов с ударно-волновым нагружением материалов. Такие эксперименты расширяют возможности фундаментальных исследований в области классической механики разрушения.

Для изучения закономерностей динамического разрушения в экспериментах часто используют такое явление как откольное разрушение [1]. Преимущество данного метода заключается в том, что схема подобного рода экспериментов позволяет определить импульс напряжений, который приводит к разрушению.

Само явление откола происходит в результате взаимодействия падающей и отраженной волн вблизи свободной поверхности образца. При этом в некоторых местах материала в некоторые моменты времени суммарное напряжение может стать растягивающим, и возможен отрыв слоя материала, так как прочность материала на растяжение значительно ниже, чем на сжатие.

Одномерная картина откольного разрушения довольно проста и открывает широкие возможности для теоретических расчетов и анализа результатов эксперимента. Но главной причиной затруднений при расчетах механической прочности является отсутствие адекватного предельного условия, определяющего момент и место образования разрыва.

Первые попытки анализа откола были связаны с применением критерия критического напряжения. Считалось, что разрушение происходит, как только растягивающее напряжение достигает предельного значения. Однако такой

подход не описывает многих характерных черт откольного разрушения, выражаемых временной зависимостью прочности и пространственным распределением разрушения [2]. Время и место образования откольного разрушения определяются в первую очередь формой, длительностью и интенсивностью импульса воздействия.

Введение инкубационного времени разрушения [3] в традиционные теоретические методы позволяет успешно анализировать различные эффекты, наблюдаемые в опытах по высокоскоростному разрушению твердых тел таких, как скоростная зависимость прочности, временная зависимость прочности, множественный откол.

Очень важным и интересным объектом изучения является зона разрушения при отколе. Классические подходы здесь не дают адекватного описания. Целью данной работы стало моделирование зон разрушения при отколе с помощью критерия инкубационного времени.

1.Откольное явление

1.1 Постановка задачи откольного разрушения и ее решение

Одним из важных объектов изучения закономерностей динамического разрушения материалов является откольное разрушение при воздействии на них кратковременными импульсами. Явление откола имеет место в результате отражения волны сжатия от свободной границы образца. Напряжение в этой волне меняет знак при отражении, тем самым превращая волну сжатия в растягивающую. Отраженная волна растяжения взаимодействует с падающей волной сжатия. При этом суммарное напряжение в некоторых сечениях материала в некоторые моменты времени может стать растягивающим и вызвать разрушение, так как прочность материала на растяжение намного ниже прочности материала на сжатие. На Рис.1 изображена схема испытаний по разрушению отколом.

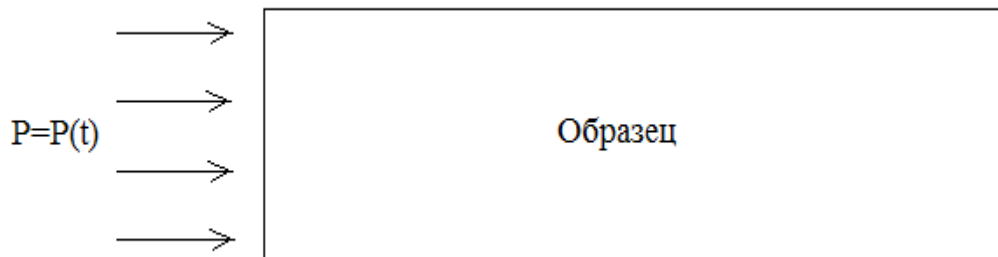


Рис.1. Схема испытаний по отколу.

Далее будем рассматривать задачу об откольном разрушении в следующей одномерной постановке [4]. Пусть ось OX направлена вдоль полубесконечного стержня (полупространства), который располагается справа от нуля, а нуль соответствует свободной поверхности. Время отсчитывается с момента прихода импульса сжимающего напряжения на свободную поверхность, т.е. от начала отражения. Тогда выражения для напряжений принимают следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \sigma_x = \rho c^2 \varepsilon_x, \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0, \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

где u – перемещение; c – скорость распространения продольной волны; ρ – плотность вещества.

Волновое уравнение в соотношении (1) имеет решение в виде интеграла Даламбера для перемещений:

$$u = F(ct - x) + G(ct + x).$$

Произвольные функции F и G определяются из начально-краевых условий:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{t<0} = -\frac{P}{\rho c^2} f(ct - x)$$

где $f(ct-x)$ – профиль импульса сжимающего напряжения с амплитудой P .

Таким образом, имеем решение в напряжениях:

$$\sigma_x = \sigma_+ + \sigma_- = Pf(ct + x) - Pf(ct - x). \quad (2)$$

Известно, что временной профиль напряжений в падающей и отраженной волне с точностью до множителя совпадают с временным профилем скорости частиц на свободной поверхности.

$$\sigma_x = \sigma_+ + \sigma_- = \frac{1}{2} \rho c V \left(t + \frac{x}{c} \right) - \frac{1}{2} \rho c V \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

Напряжение в точке, отстоящей на расстоянии x от свободной поверхности, определяется разностью между функцией $V(t)$ и этой же функцией, сдвинутой по аргументу на время равное удвоенному времени пробега волны от рассматриваемого сечения до свободной поверхности.

$$\sigma_x(t, x) = \frac{1}{2} \rho c \Delta V \quad (3)$$

$$\Delta V(t, x) = V(t) - V\left(t - \frac{2x}{c}\right)$$

Изменение суммарного напряжения вдоль стержня с течением времени может приводить к условиям, обеспечивающим отрыв части материала. Результат наложения двух волн после отражения от свободной поверхности изображен на Рис.2,б.

Возникает необходимость введения критериального соотношения, позволяющего адекватно оценивать время и место выполнения условий разрушения материала.

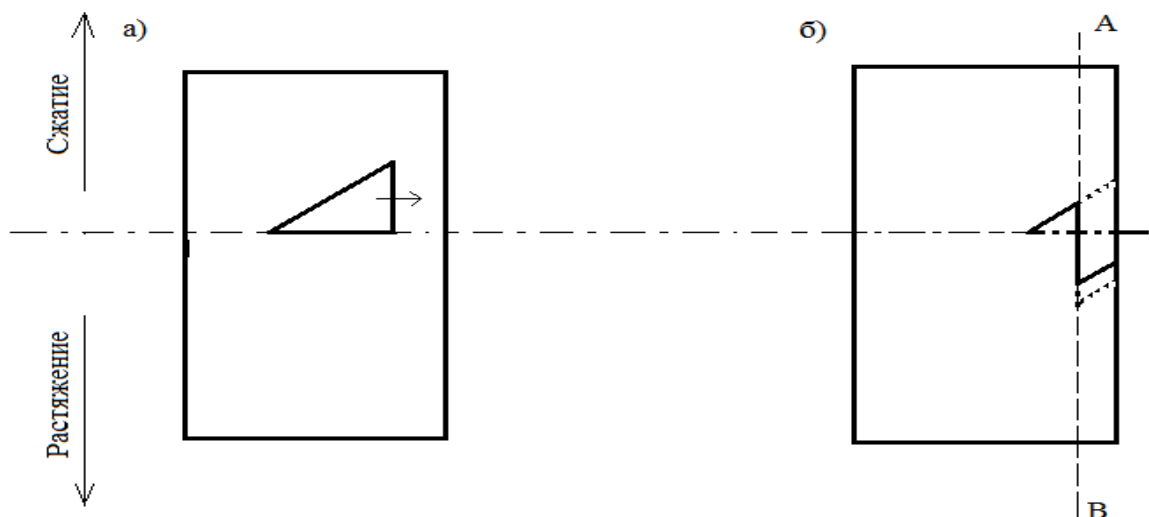


Рис.2. Распределение напряжений в полупространстве при отражении импульса сжатия от свободной поверхности: а – до отражения; б – после отражения; AB – откольное сечение.

1.2 Описание эксперимента по отколу

В данной работе использовались результаты экспериментов [5], в которых в качестве образца был использован песчаник цилиндрической формы диаметром 60 мм и длиной 300 мм со свойствами, представленными в Таблице 1.

Плотность образца, кг/м ³	Скорость продольной волны в образце, м/с	Статическая прочность, МПа
2018	2742	3.7

Табл.1

На Рис.3 показана фотография: на ней изображена главная часть установки, с помощью которой осуществляется эксперимент по отколу. Основная часть состоит из трех компонент: сам образец, прозрачная трубка из оргстекла, наполненная водой, и взрывчатка.

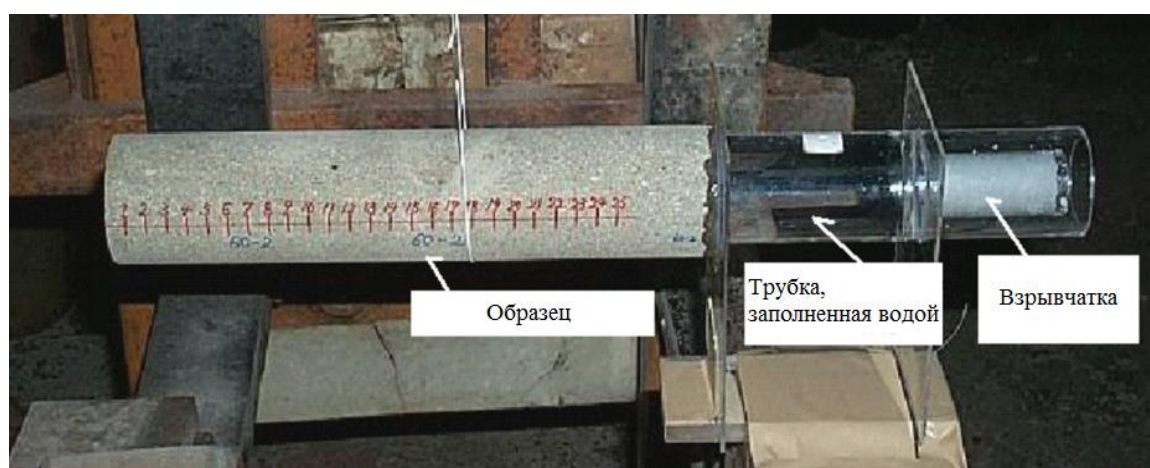


Рис.3. Основная часть установки.

Данный эксперимент имеет следующие особенности. Трубка, наполненная водой, помещается между образцом и взрывчаткой. Форма сжимающего импульса напряжений регулируется при помощи нескольких параметров: количеством и типом взрывчатки, длиной трубки. Изменяя эти параметры,

можно также менять амплитуду и длительность воздействия импульса. За скоростью свободной поверхности образца и откольными сечениями можно наблюдать благодаря использованию лазерного виброметра и высокоскоростной камеры. Для контроля времени инициирования взрыва используется точный детонатор. В качестве взрывчатки взято 40г эмульсионного взрывчатого вещества. Длина трубки варьировалась: 30, 50, 70, 100, 150, 200 и 300 мм. Кадры из эксперимента изображены на Рис. 4.

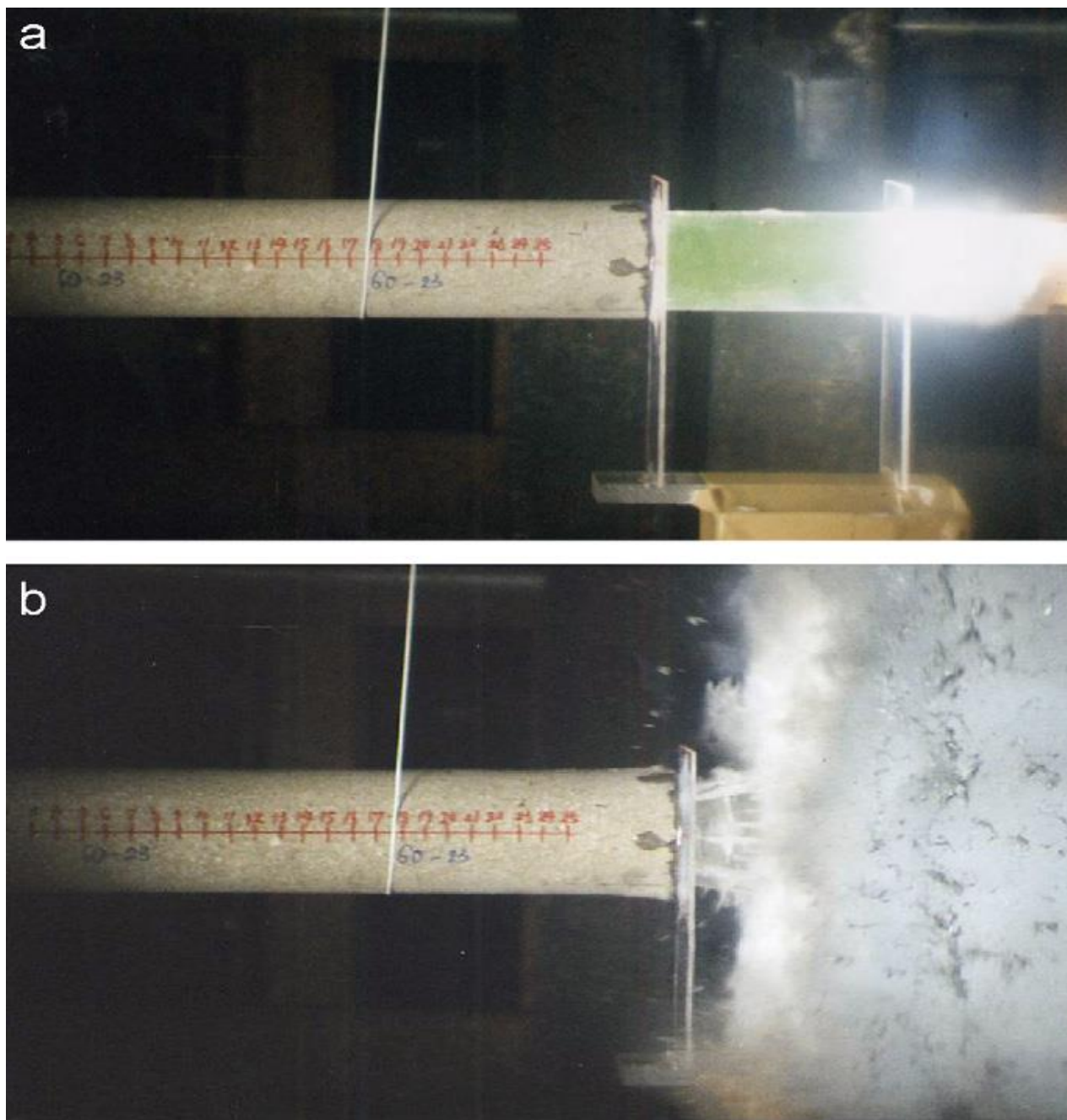


Рис. 4. Фотографии высокоскоростной камеры во время эксперимента: а – начало взрыва, б – спустя 240мкс.

2. Обработка экспериментальных данных и анализ результатов

2.1 Критерий инкубационного времени

В силовом походе в механике разрушения имеет смысл достижения определенного критического значения мгновенной локальной силой, которая действует в месте разрыва. Однако в динамике необходимо брать в расчет свойство инерции, так как элементы среды, которые примыкают к месту разрыва, могут двигаться с очень большими скоростями.

Структурно-временной подход разрешает данные недочеты. Одним из важных феноменологических обоснований этого подхода является то, что для того, чтобы случилось разрушения, локальная сила должна действовать в течение определенного времени. Логично рассматривать средние значения от разрывающего напряжения на структурно-временном интервале. Поэтому будем считать, что имеется некоторый характерный промежуток времени τ , который отвечает за инкубационный период развития макроразрушения.

В случае изучения откола в эксперименте напряженное состояние в образце принимаем зависящим только от одной координаты. Критерий для “бездефектной” среды при этом принимает следующий вид:

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(s, x) ds < \sigma_c \tau \quad (4)$$

где $\sigma(s, x)$ – напряжение в сечении с координатой x в момент времени s ; τ – независимая характеристика материала размерности времени; σ_c – статическая прочность материала.

2.2. Определение места и времени разрушения

Исследуем при помощи структурно-временного подхода место образца, в котором произойдет разрушение, и время, когда это случится.

В описанных выше экспериментах на откол в извлеченных образцах можно наблюдать два откольных сечения (Рис. 5). Эта картина соответствует испытаниям, в которых длина трубки была равна 50 мм и 70 мм. Как видно на фотографиях, откольные сечения расположены от свободной поверхности на расстояниях $\approx 0,05$ м и 0,12 м, когда использовалась трубка длиной 50 мм, и на расстояниях $\approx 0,45$ м и 0,95 м в случае 70 мм трубки.

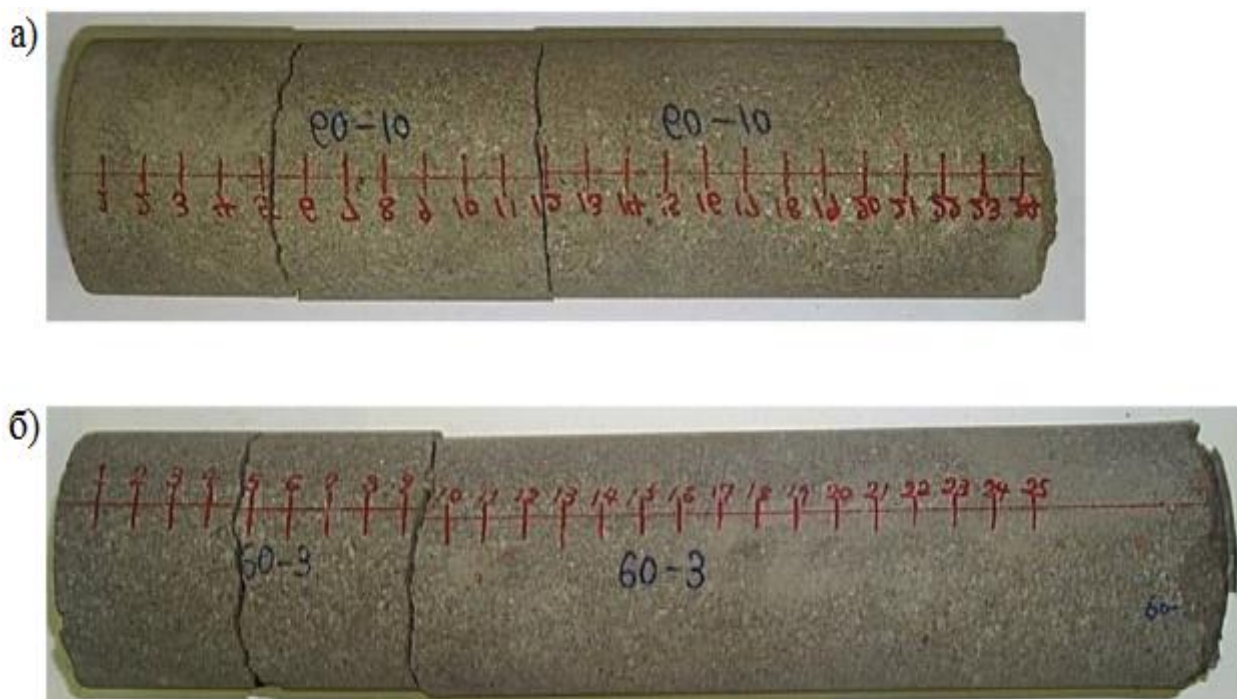


Рис.5. Извлеченный после эксперимента образец: а) - длина трубки 50 мм, б) – 70 мм.

Из эксперимента был взят профиль скорости, после чего он был аппроксимирован линейной функцией, как показано на Рис.6.

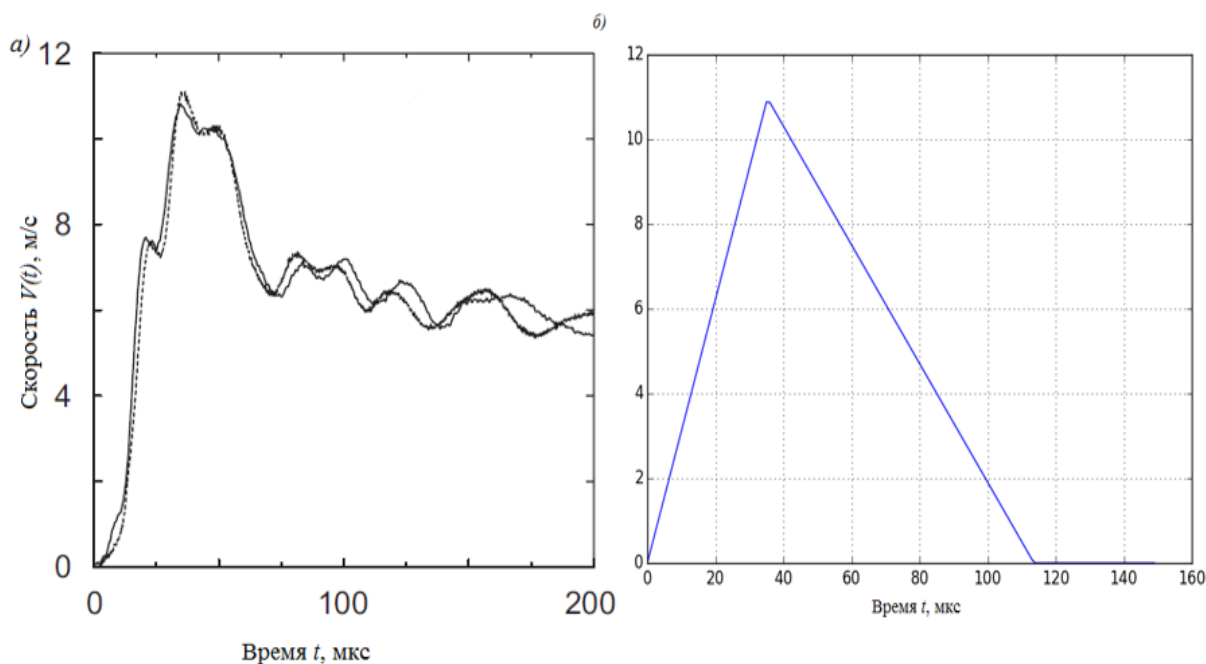


Рис.6. Профиль скорости свободной поверхности (длина трубки 50 мм): а) – из эксперимента, б) – аппроксимированный.

Тогда можно рассчитать напряжение в каждом сечении, используя формулу (3). На Рис.7 построены графики зависимости напряжений от времени при фиксированных сечениях. Время на графиках отсчитывалось с момента прихода сжимающей волны в данное сечение. Так как растягивающие напряжения приводят к разрушению, то при построении они полагались положительными, а сжимающие, соответственно, отрицательными. На графиках также видно, что чем ближе сечение к свободному краю, тем раньше накладываются друг на друга волны сжатия и растяжения (Рис.7, а и б). И наоборот, если смотреть на то, как меняется напряжение со временем в сечениях, расположенных дальше от свободной поверхности (Рис.7, г), можно заметить, что ввиду того, что волне требуется время для прохождения от свободного края до данного сечения, падающая и отраженная волны не успевают накладываться.

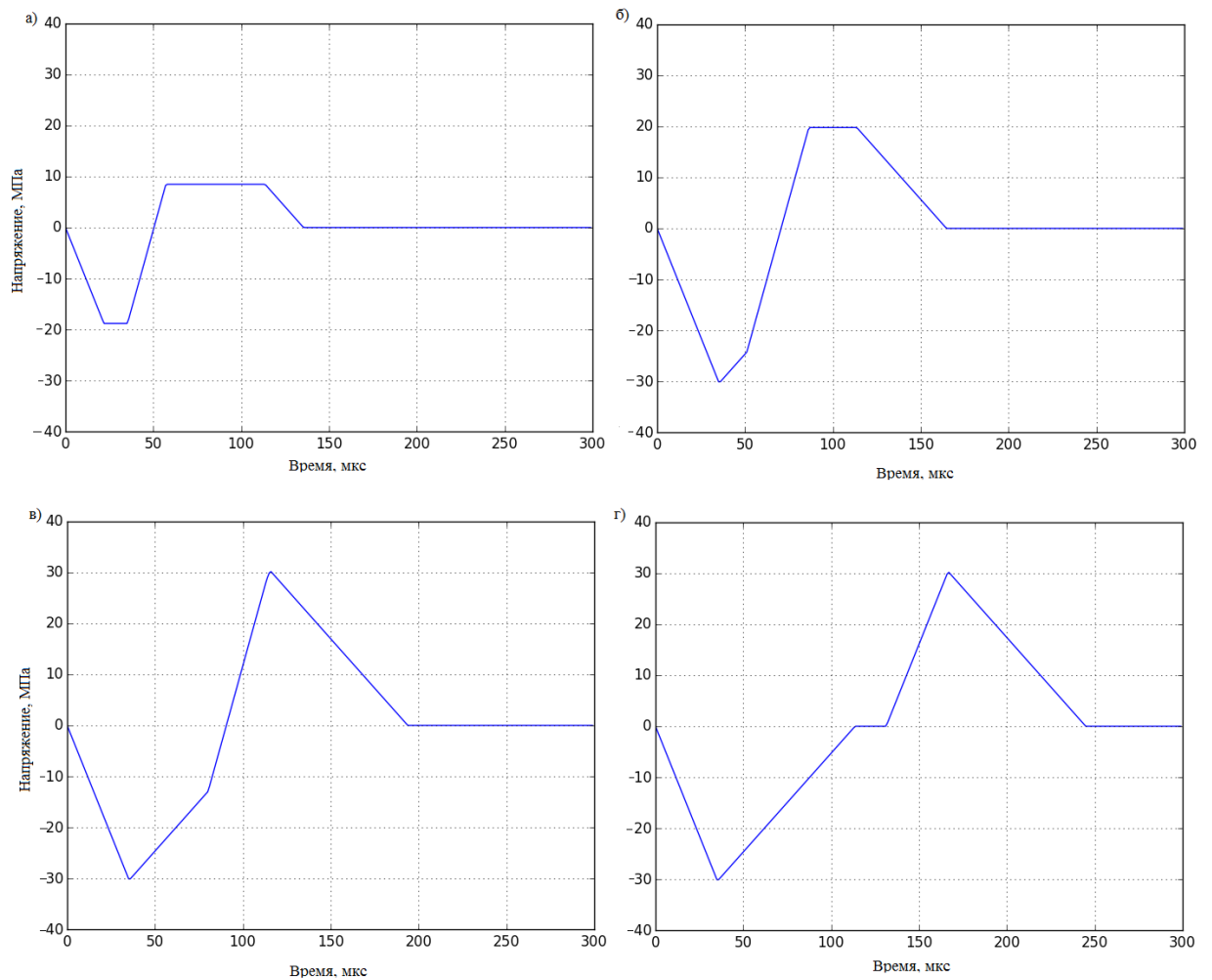


Рис.7. Графики напряжений в различных сечениях (длина трубки 50 мм): а) – 0,03 м, б) – 0,07 м, в) – 0,11 м, г) – 0,18 м.

Далее была изучена зависимость времени нарушения критериального соотношения (т.е. момента возникновения условия разрушения) от сечения. Параметр τ для песчаника был вычислен в экспериментах [6] и взят равным 65 мкс. Используя критерий

$$\int_{t_*-\tau}^{t_*} \sigma(s, x) ds = \tau \sigma_c ,$$

было найдено время t_* (минимальный момент времени, в который нарушится условие критерия) в каждом сечении. На Рис.8 приведен график зависимости момента возникновения условия разрушения от координаты для данного эксперимента с конкретной нагрузкой (см. Рис.6). Координата отсчитывалась от

свободной поверхности, а время - с момента прихода на эту поверхность сжимающего импульса (падающей волны). На графике видно, что минимальное время разрушения наступает в сечении 0,09 м. Но этот минимум слабо выражен, поэтому можно считать, что условие разрушения быстрее всего наступает одновременно в некоторой области, отсеченной пунктирной линией. Красными точками отмечены сечения, в которых произошел откол в эксперименте (0,05 м и 0,12 м соответственно). Эти точки попадают в предполагаемую зону разрушения.

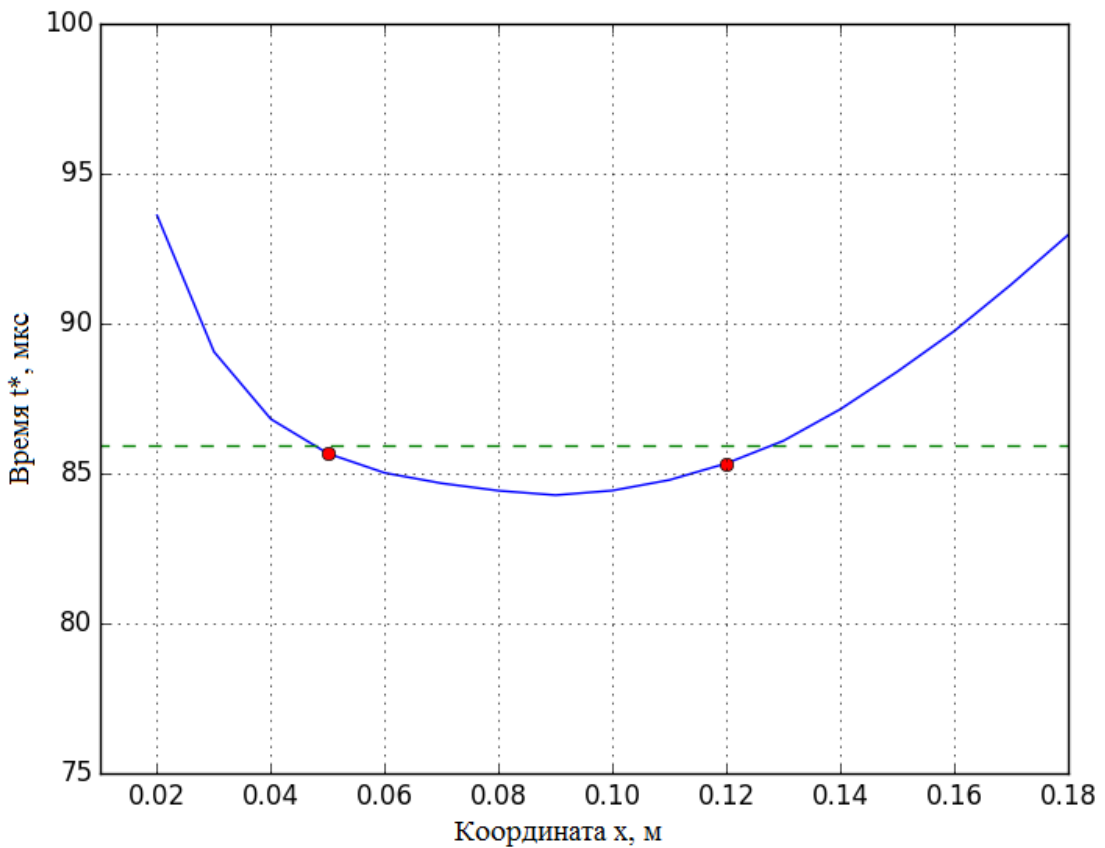


Рис.8. Зависимость момента нарушения критерия от сечения x (длина турбки 50 мм); красными точками отмечены откольные сечения из эксперимента.

Аналогичный анализ и рассуждения были проведены для эксперимента, в котором использовалась трубка длиной 70 мм.

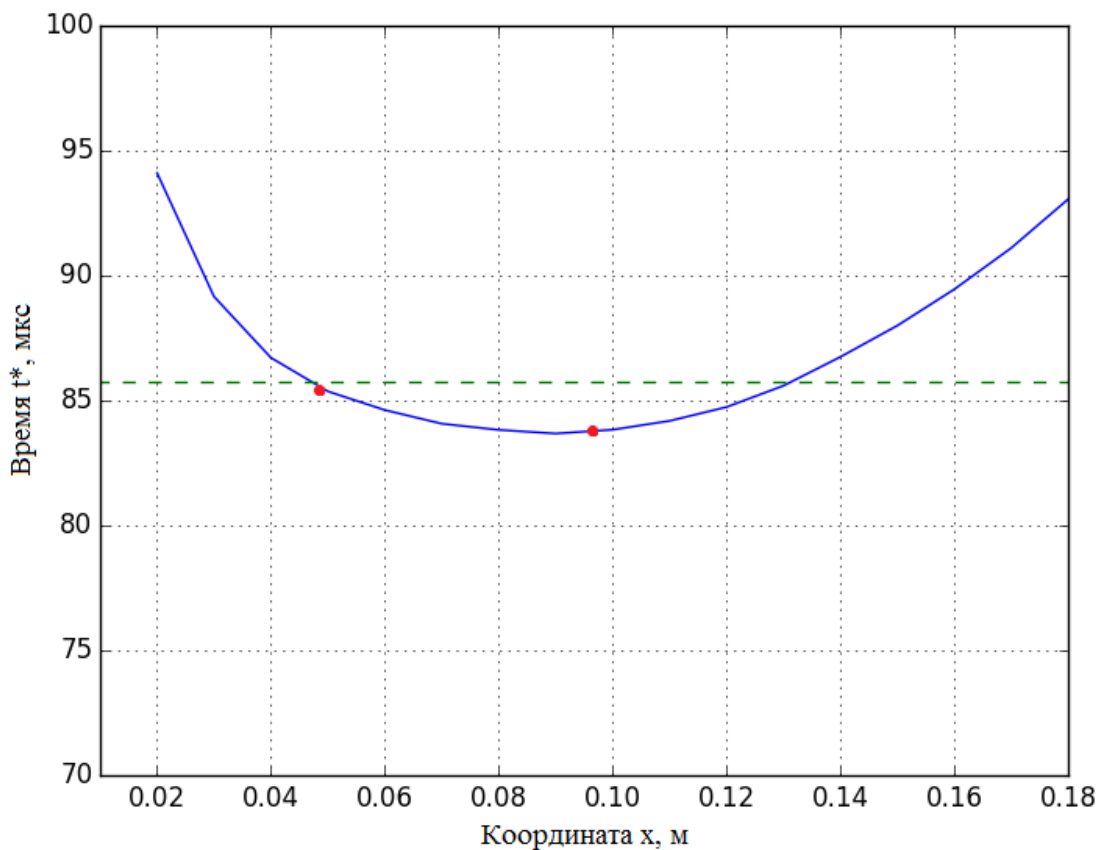


Рис. 9. Зависимость момента нарушения критерия от сечения x (длина турбки 70 мм); красными точками отмечены откольные сечения из эксперимента.

На Рис. 9 также видно, что откольные сечения, полученные экспериментальным способом (красные точки), входят зону, где быстрее всего, согласно критерию, наступает условие разрушения.

Таким образом, анализ экспериментов показал, что критерий инкубационного времени позволяет предсказать место в образце, в котором вероятнее всего произойдет откол.

Заключение

На основе данных экспериментов по откольному разрушению была построена зависимость времени разрушения от места в образце, с помощью которой была найдена зона предполагаемого разрушения.

Установлено, что полученные результаты согласуются с экспериментальными.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующий вывод. Структурно-временной подход изучения явления откола позволяет спрогнозировать зону разрушения.

Литература

1. Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках // Физика твердого тела. 1974. Т. 16. Вып. 6. С. 1752–1755.
2. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979.
3. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 1997.
4. Уткин А.А., Петров Ю.В., Смирнов И.В. Структурно-временная теория откольного разрушения. СПб.: Политехника, 2016.
5. Shiro Kubota, Yuji Ogata, Yuji Wada, Ganda Simangunsong, Hideki Shimada, Kikuo Matsui. Estimation of dynamic tensile strength of sandstone// In: International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences -2008-V.45-P.397–406
6. Y.V. Petrov. Structural-temporal approach to modeling of fracture dynamics in brittle media// In: Rock Dynamics and Applications – State of the Art /J.Zhao & J.Li (eds)/ 2013. Taylor & Francis Group, London. P.101-110.