

УДК 539.42

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КРИТИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОТКОЛА

© 2020 г. Ю. В. Петров^{a,b,*}, А. А. Уткин^{b,**}

^a ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

^b Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: y.v.petrov@spbu.ru

**e-mail: a.utkin51@gmail.com

Поступила в редакцию 11.01.2020 г.

После доработки 15.01.2020 г.

Принята к публикации 29.01.2020 г.

Многие особенности динамического разрушения, вызванного ударно-волновым воздействием, наиболее ярко проявляются в условиях откола, т.е. при отражении интенсивного волнового импульса от свободной границы. Поэтому, такие испытания материалов являются одним из основных способов изучения процессов разрушения, протекающих в твердом теле в условиях сверхбыстрого динамического растяжения. Тем не менее, относительно мало исследованной областью являются геометрические характеристики зоны разрушения, образующейся в условиях откола. Экспериментально установлено, что качественный вид такой области множественного разрушения характеризуется сильной неустойчивостью и зависит от параметров приложенного импульса, таких как скорость роста и спада напряжения, амплитуда, продолжительность. На основе анализа ряда экспериментальных результатов ниже будет показано, что наблюдаемое в опытах неустойчивое поведение зоны разрушения, образующейся в условиях откола, может быть объяснено и спрогнозировано при помощи структурно-временного подхода, базирующегося на понятии инкубационного времени разрушения.

Ключевые слова: динамическое разрушение, импульсная нагрузка, откол, скоростная зависимость прочности, инкубационные процессы

DOI: 10.31857/S0572329920030149

1. Введение. Явление откола, возникающее в результате взаимодействия волнового импульса сжатия со свободной поверхностью и возникновения отраженной волны растяжения, разрывающей материал, дает уникальную возможность для изучения закономерностей разрушения материалов при высокоскоростном динамическом растяжении при экстремальных скоростях деформации выше 10^3 с^{-1} .

В настоящее время динамическую прочность связывают, как правило, только со скоростью деформации материала в сечении откола в моменты, предшествующие разрушению, не принимая во внимание иные параметры временного профиля исходного импульса, такие, например, как его длительность, а также наличие различных стадий. Большая часть исследований в этой области направлена на установление упомянутой “скоростной” зависимости прочности, которая часто трактуется как функция материала. Однако, многие обнаруживаемые в экспериментах эффекты не укладываются в общепринятую модель, что приводит к ее значительным усложнениям. В частности,

такowymi являются, например, эффект “стабилизации” прочности [1] и разрушение при скорости деформирования в сечении откола близкой к нулевой [2].

Также мало исследованной является образующаяся при ударном воздействии геометрия зоны множественного разрушения. Установлено, что качественный вид области разрушения очень сильно зависит от параметров приложенного импульса, таких как скорость роста и спада напряжения, амплитуда, продолжительность. При этом сама разрушенная область может представлять собой набор отдельных откольных трещин и раздробленных областей конечной протяженности. Геометрические характеристики зоны разрушения, такие как расположение откольных трещин относительно друг друга и границ образца, оказываются весьма неустойчивыми по отношению к параметрам временного профиля исходного импульса. На геометрию зоны разрушения может также оказывать влияние наличие дефектов (ослабленных сечений) реального материала, т.е. ее возникновение носит отчасти статистический характер. Следовательно, для изучения этого явления необходимо проводить серии испытаний с одинаковыми нагрузками. Именно такие испытания, показавшие, в частности, сильную неустойчивость положения откольной зоны, и были проведены в [3]. Ниже показано, что обнаруженные в этих испытаниях эффекты можно с единой точки зрения объяснить и аналитически смоделировать на основе структурно-временного подхода и соответствующего критерия инкубационного времени разрушения [4–7].

2. Структурно-временной подход. Предполагается, что исходный волновой импульс напряжения распространяется в линейно-упругом материале и при его движении не происходит никаких потерь. В этом случае напряжение в отраженной от свободной границы волне меняет знак на противоположный, тогда как его абсолютная величина не меняется. Критерий инкубационного времени в общем виде был предложен в [4]. В случае испытаний на откол, производимый продольными волнами напряжений, напряженное состояние в образце, как правило, принимается зависящим только от одной координаты. Критерий разрушения в этом случае принимает форму [1, 2, 5, 7]:

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(s, x) ds < \sigma_c \tau \quad (2.1)$$

где $\sigma(s, x)$ – напряжение в точке с координатой x в момент времени s , τ – структурное или инкубационное время – независимая характеристика материала размерности времени, σ_c – прочность материала в статике.

Время t отсчитывается от начала момента отражения исходного импульса от свободной границы, а координата x задает расстояние до нее. Временем разрушения считается тот наименьший момент, при котором нарушилось критериальное условие (2.1).

Критические характеристики разрушения могут связываться с различными параметрами профиля исходного импульса, в частности, с его продолжительностью и амплитудой. Многочисленные исследования процесса динамического разрушения в рамках структурно-временного подхода на базе концепции инкубационного времени подтвердили его эффективность и предсказательную силу. В настоящее время он стал действенным инструментом расчета высокоскоростных динамических процессов, применяемым в различных областях науки [6, 7]. Далее дается основанный на данном подходе метод определения геометрических характеристик зоны разрушения, образуемой импульсами специальной формы.

Далее вводится в рассмотрение понятие минимального разрушающего импульса. Пусть имеется конкретный временной профиль воздействия (в общем случае он может иметь вид равнобедренного или прямоугольного треугольника, трапеции, синуса и т.д.) и его длительность T . Форма воздействия на образец часто определяется характеристиками установки для проведения испытаний (это может быть, например, тол-

щина ударника, емкость и индуктивность электрического зарядного устройства или мощность лазера). Пусть при заданной длительности T и форме временного профиля воздействия существует наименьшая амплитуда A_* , которая приводит к разрушению. Такой импульс будет называться минимальным разрушающим или пороговым, если изменение его величины за счет уменьшения амплитуды не приводит к разрушению, в то время как увеличение амплитуды будет сохранять разрушение.

3. Зона разрушения в случае трапецидального импульса. Для изучения качественных геометрических характеристик зоны разрушения рассматривается исходный импульс напряжения в виде трапеции. Во многих случаях реальное нагружение при испытаниях может с достаточной точностью быть представлено в виде воздействия трапецидального временного профиля. Пусть в образце создан импульс напряжений трапецидальной формы $f(t)$. При этом продолжительности роста и спада импульса будут обозначаться как T_1 и T_3 соответственно, а длительность постоянного участка как T_2 . Таким образом, общая продолжительность воздействия $T = T_1 + T_2 + T_3$. Пусть A – его амплитуда (соответствует величине напряжения на постоянном участке). Таким образом

$$f(t) = A \begin{cases} 0 & t < 0, \quad t > T \\ \frac{t}{T_1}, & t \leq T_1 \\ 1, & T_1 \leq t \leq T_1 + T_2 \\ 1 - \frac{t - T_1 - T_2}{T_3}, & T_1 + T_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (3.1)$$

Здесь предполагается, что время t отсчитывается от момента прихода сжимающей волны на границу (от момента начала отражения) $x = 0$, а координата x соответствует расстоянию до свободной границы (упругая среда располагается при $x > 0$). Решая соответствующую динамическую задачу теории упругости, можно получить, что напряжение в сечении x в момент времени t задается суммой напряжений в падающей сжимающей и отраженной растягивающей волнах

$$\sigma(t, x) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) - f\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (3.2)$$

Здесь c скорость распространения продольной волны.

Применяя критерий (2.1) к решению (3.2), аналогично тому, как это было сделано для случая воздействия импульсами треугольной формы в [1], можно найти для рассматриваемого воздействия наименьшую разрушающую (пороговую) амплитуду A_* , а также момент разрушения t_* и координату откольного сечения x_* . Можно показать, что пороговая амплитуда будет определяться при помощи прямой подстановки функции временного профиля (3.1) в критерий (2.1). То минимальное значение A_* , при котором нарушится условие (2.1) и будет искомым в силу его определения. Учет взаимодействия волн для этого не требуется (в случае запороговых разрушающих импульсов это не так). Для того чтобы определить момент разрушения и координату откольного сечения в критерий (2.1) следует подставлять полное напряжение, образуемое сов-

местно как прямой, так и отраженной волной (3.2). После проведения необходимых вычислений получается:

$$A_* = \begin{cases} \frac{2 \sigma_c \tau}{T + T_2}, & \tau \geq T \\ \frac{2 \sigma_c \tau}{T + T_2 - (T - \tau)^2 / (T - T_2)}, & T_2 \leq \tau \leq T \\ \sigma_c & \tau \leq T_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$t_* = \begin{cases} T + \frac{\tau}{2}, & \tau \geq T \\ \tau + \frac{T}{2} + \frac{(T - \tau) T_1}{2 (T - T_2)}, & T_2 \leq \tau \leq T \\ \tau + \frac{T + T_1}{2} & \tau \leq T_2 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$x_* = \begin{cases} \frac{c\tau}{2}, & \tau \geq T \\ \frac{c}{2} \left(T - \frac{(T - \tau) T_1}{(T - T_2)} \right), & T_2 \leq \tau \leq T \\ \frac{c (T - T_1)}{2} & \tau \leq T_2 \end{cases} \quad (3.5)$$

Таким образом, для рассматриваемого порогового импульса выражение (3.4) определяет наименьший момент времени t_* , при котором нарушится критериальное условие (2.1), а формула (3.5) задает координату соответствующего сечения, в котором реализуется разрушение.

Одной из особенностей разрушения при динамическом нагружении является возможность приложения запороговой нагрузки с амплитудой, превышающей критическую, т.е. минимально необходимую для разрыва материала. Превышение приложенной нагрузки пороговой можно трактовать как перегрузку. Соответствующие импульсы будут далее называться перегруженными. Разрушение при этом может происходить уже с иными значениями времени разрыва и координаты откольного сечения. В случае перегрузки для рассматриваемой трапецеидальной формы профиля исходного импульса также можно получить аналитические выражения, аналогичные (3.4), (3.5), но они слишком громоздки. На рис. 1 а–с показана соответствующая зависимость времени разрушения t_* от координаты сечения образца x при различных перегрузках и соотношениях продолжительностей импульса. Приведенные значения координаты сечения и времени нормированы. По оси абсцисс откладывается $x/c\tau$, а по оси ординат t_*/τ . При этом сплошная линия соответствует отсутствию перегрузки (пороговый импульс), пунктирная – случаю перегрузки в 2 раза, точечная – в 10 раз. На рис. 1а $T \leq \tau$ ($T = 3\tau/4$), на рис. 1б $T_2 \leq \tau \leq T$ ($T = 5\tau/4$, $T_2 = 5T/8$) и, наконец, на рис. 1с – $T_2 \geq \tau$ ($T = 9\tau/4$, $T_2 = 5T/8$).

Приведенные расчеты показывают, что воздействие “перегруженным” импульсом приводит к тому, что условие разрушения наступает одновременно в некоторой зоне образца. Эта зона тем шире, чем выше перегрузка. Таким образом, согласно приме-

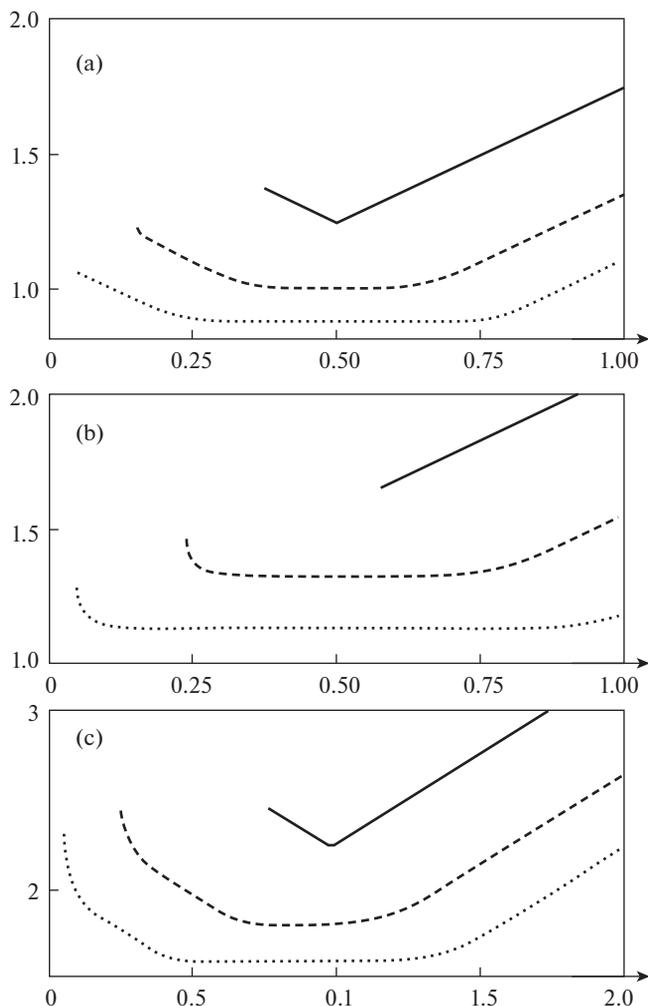


Рис. 1

ненной модели, можно ожидать, что при нагружении реальным, отличным от порогового, импульсом при проведении эксперимента в материале может возникнуть область, в которой одновременно (или почти одновременно) реализуется условие разрушения, что приведет к протяженным раздробленным зонам, наблюдавшимся, например, в [8, 9].

4. Результаты экспериментов по изучению зоны разрушения. Большинство исследований по откольному разрушению связано с установлением “скоростной” зависимости прочности, которая часто трактуется как функция материала. Изучение зоны разрушения при отколе носит, как правило, эпизодический характер. Так, в [8] отмечено, что область разрушения может иметь вид раздробленных участков, чередующихся с неразрушенными перемычками. То же самое отмечается в экспериментах по откольному разрушению пластин, описанных в [9]. Причем, как показывают опыты, каче-

ственный вид области разрушения нестабилен и сильно зависит от параметров внешнего импульса, таких как скорость нагружения, амплитуда, продолжительность.

Далее рассмотрены эксперименты по изучению поведения зоны разрушения при отколе, описанные в [3]. В качестве материала для образцов был использован песчаник (Kimachi sandstone) цилиндрической формы диаметром 60 мм и длиной 300 мм. При этом плотность $\rho = 2018 \text{ кг/м}^3$, скорость продольной волны $c = 2742 \text{ м/с}$, статическая прочность $\sigma_c = 3.7 \text{ МПа}$. В качестве источника динамической нагрузки использовалась заполненная водой труба, размещенная между взрывчатым веществом и цилиндрическим образцом. Для получения различной интенсивности нагрузки варьировалась длина трубы (30, 50, 70, 100, 150, 200 и 300 мм). С увеличением длины трубы интенсивность воздействия уменьшалась. Для каждой длины трубы была проведена серия экспериментов. Измерение скорости свободной поверхности образца позволило получать историю нагружения. Была обнаружена достаточно хорошая воспроизводимость профилей скорости, измеряемых на свободном конце образцов в каждой серии. Также при помощи высокоскоростной камеры проводилось наблюдение за положением возникающих откольных трещин. Было установлено, что в каждой серии координаты откольных сечений достаточно сильно изменяются от опыта к опыту. Координаты откольных сечений находятся в диапазоне от 3–4 до 10–15 см. Кроме того при длине трубы 30, 50 и 70 мм наблюдалось образование двух откольных сечений. Таким образом, было установлено, что однозначной связи между амплитудой приложенной нагрузки и координатой откольного сечения практически нет.

5. Сопоставление расчета с экспериментом по образованию откольных сечений. Будет показано, что обнаруживаемые в опытах эффекты можно объяснить приведенным выше способом на основе структурно-временного подхода. Пусть измеренная в эксперименте скорость свободной поверхности имеет вид $v(t)$. Пусть, как и в предыдущем анализе, время отсчитывается от момента, при котором $v(t)$ становится отличной от нуля, т.е. от момента начала отражения, а координата свободной поверхности принимается равной нулю. Тогда напряжения в материале можно определить по формуле

$$\sigma(t, x) = \frac{1}{2} \rho c \left(v \left(t - \frac{x}{c} \right) - v \left(t + \frac{x}{c} \right) \right) \quad (5.1)$$

Подставляя (5.1) в (2.1) можно для каждого конкретного сечения x определить, нарушится ли критериальное условие. В том случае, если для данного сечения условие нарушается, можно найти тот минимальный момент времени, при котором это произошло. Соответствующие экспериментам, описанным в [3], расчетные зависимости для различной длины трубы приведены на рис. 2. По оси абсцисс откладывается расстояние в сантиметрах от свободной поверхности образца, а по оси ординат время в мкс от момента начала отражения. Сплошной линии соответствует расчет для длины трубы в 50 мм, пунктирной – 70 мм, точечной – для трубы 100 мм и штрихпунктирной 200 мм. Как видно из графиков, во всех рассмотренных случаях имеется область, в которой почти одновременно реализуется условие разрушения. Эта область простирается от 3–4 до 10–15 см. Кружками на расчетных кривых обозначены откольные сечения, образованные при проведении опытов. Все зафиксированные в эксперименте откольные сечения попадают в область, в которой условие разрушения реализуется в наименьшие моменты времени.

Таким образом, показано существование протяженной по координате области материала, в которой почти одновременно может реализоваться условие разрушения. Следовательно, обнаруженная закономерность связана не только с характеристиками

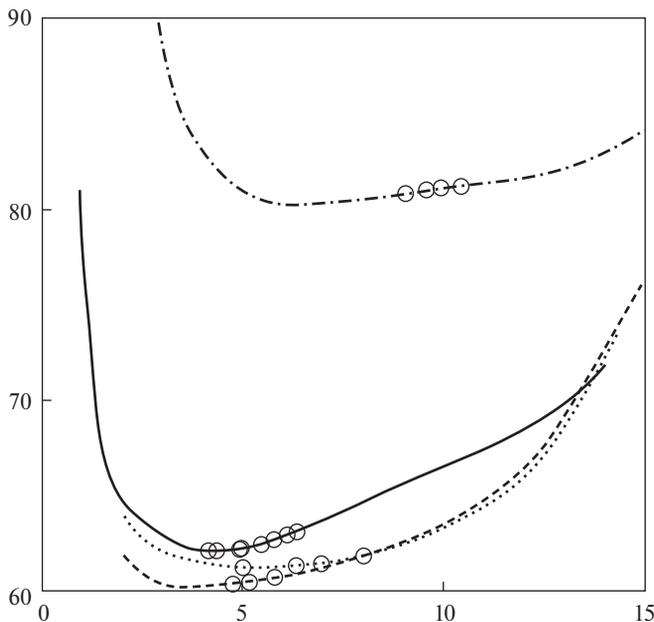


Рис. 2

материала, но обусловлена, прежде всего, воздействием импульсов, превышающих минимально необходимые для разрушения. Иными словами, данное явление возникает при воздействии перегруженными импульсами.

Для иллюстрации вышесказанного проведен анализ еще двух работ, в которых рассматриваются серии испытаний с разными уровнями нагрузки. В [10] рассмотрены серии испытаний на откол сплавов различных сталей. В этой работе приведены скорости перемещения свободной поверхности $v(t)$, зафиксированные при проведении экспериментов, что позволяет восстановить приложенные к образцам нагружающие импульсы напряжения по формуле $\sigma(t) = 1/2 \rho c v(t)$ и воспользоваться критерием (2.1) для анализа разрушения. Было рассмотрено разрушение образцов из стали А3. Материал имеет следующие свойства: плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, скорость продольной волны $c = 5100 \text{ м/с}$, статическая прочность $\sigma_c = 930 \text{ МПа}$. Максимальная величина приложенных к образцам напряжений превышала статическую прочность от 6 до 10 раз. При помощи структурно-временного подхода была построена зависимость времени разрушения от координаты. Величина структурного времени выбиралась следующим образом. При проведении испытаний одного из образцов откол не наблюдался. Вычисления для этого образца на основе структурно-временного подхода показывают, что разрушение не должно происходить, если $\tau > 3.96 \text{ мкс}$. С увеличением интенсивности воздействия на остальных образцах откол уже фиксировался. Проведенный таким же образом анализ для остальных образцов показал, что для реализации разрушения должно выполняться следующее соотношение: $\tau < 5.0 \text{ мкс}$. При проведении расчетов было принято $\tau = 4.5 \text{ мкс}$. Перегрузка в этом случае изменяется от 1.2 до 2.5 раза. Расчет зависимости времени разрушения от координаты в этих экспериментах приведен на рис. 3. По оси абсцисс откладывается расстояние в сантиметрах от свободной поверхности образца, а по оси ординат время в мкс от момента начала отражения. В этом случае область материала, в которой почти одновременно реализуется условие

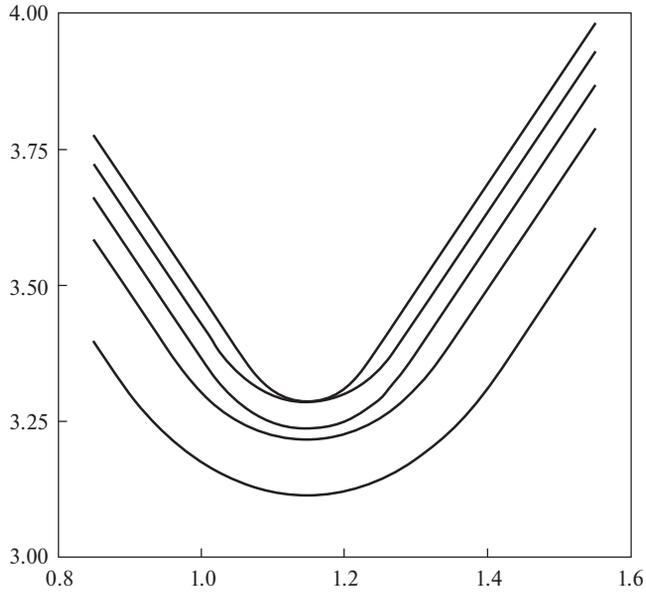


Рис. 3

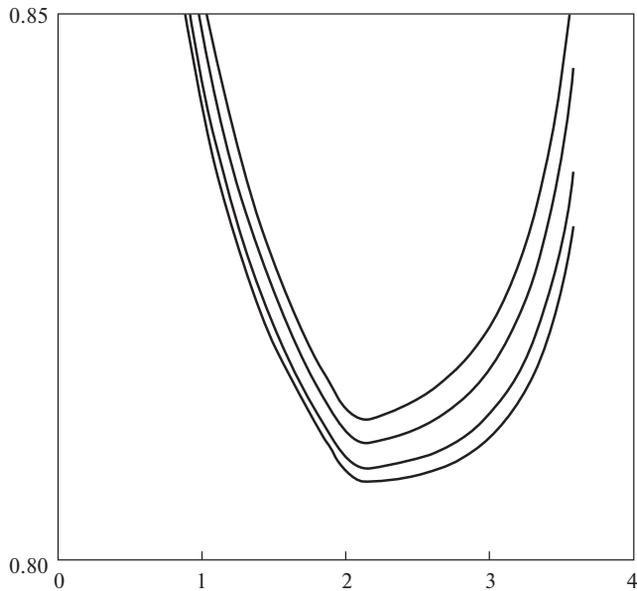


Рис. 4

разрушения не ярко выражена. С ростом интенсивности воздействия (чем выше интенсивность тем ниже соответствующая расчетная линия) кривая в окрестности минимума становится более полой, что может привести к увеличению объема зоны множественного разрушения. Проведенные оценки качественно согласуются с экспериментальными наблюдениями [10].

Рассмотрим серию испытаний на откол импульсами высокой интенсивности образцов из стали 10, реализованную в [11]. В работе была изучена степень откольной микроповрежденности материала в зависимости от координаты. Материал имеет следующие свойства: плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, скорость продольной волны $c = 5100 \text{ м/с}$, статическая прочность $\sigma_c = 343 \text{ Мпа}$. Максимальная величина приложенных к образцам напряжений превышала статическую прочность от 30 до 45 раз. При проведении расчетов было принято $\tau = 0.8 \text{ мкс}$. Перегрузка по величине приложенного импульса напряжений в этом случае изменяется от 12 до 20 раз. Расчет зависимости времени разрушения от координаты в этих экспериментах приведен на рис. 4. По оси абсцисс откладывается расстояние в миллиметрах от свободной поверхности образца, а по оси ординат время в мкс от момента начала отражения. Зона наибольшей микроповрежденности материала, обнаруженная при проведении экспериментов, располагалась в интервале от 1.6 до 2.4 мм, что вполне согласуется с расчетом.

6. Заключение. Таким образом, наблюдаемое неустойчивое поведение зоны множественного разрушения, образующейся в условиях откола, может быть объяснено на основе структурно-временного подхода, базирующегося на понятии инкубационного времени разрушения. Предложенный выше способ позволяет эффективно прогнозировать как критические характеристики импульсов приводящих к разрушению, так и качественные геометрические характеристики откольной зоны, наблюдаемые в экспериментах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (18-51-80008 и 20-01-00291 А). Разделы 2, 3 выполнены А.А. Уткиным при поддержке Российского научного фонда (проект 17-11-01053).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petrov Y.V., Smirnov I.V., Utkin A.A.* Effects of strain-rate strength dependence in nanosecond load duration range // *Mechanics of Solids*. 2010. V. 45 (3). P. 476–484.
2. *Petrov Yu.V., Utkin A.A.* Time dependence of the spall strength under nanosecond loading // *Technical Physics*. 2015. V. 60(8). P. 1162–1166.
3. *Kubota S., Ogata Y., Wada Y., Simangunsong G., Shmada H., Matsui K.* Estimation of dynamic tensile strength of sandstone // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2008. V. 45. P. 397–406.
4. *Petrov Y.V., Utkin A.A.* Dependence of the dynamic strength on loading rate // *Sov. Mater. Science*. 1989. V. 25(2). P. 153–156.
5. *Morozov N.F., Petrov Y.V., Utkin A.A.* Analysis of spall fracture from the viewpoint of structural fracture mechanics // *Sov. Phys. Dokl.* 1990. V. 35. P. 646.
6. *Gruzdkov A.A., Petrov Y.V.* Cavitation breakup of low- and high-viscosity liquids // *Technical Physics*. 2008. V. 53 (3). P. 291–295.
7. *Petrov Yu.V., Sitnikova E.V.* Dynamic Cracking Resistance of Structural Materials Predicted from Impact Fracture of an Aircraft Alloy // *Technical Physics*. 2004. V. 49. № 1. P. 57–60.
8. *Broberg K.B.* Some aspects of the mechanism of scabbing // *International symposium on stress wave propagation*. N.Y. Interscience Publishers. Inc. 1960. P. 229–246.
9. *Seaman L., Curran D.R., Murri W.J.* A continuum model for dynamic tensile microfracture and fragmentation // *J. of Applied Mechanics*. 1985. V. 52. P. 593–600.
10. *Мещеряков Ю.И., Диваков А.К., Жигачева Н.И., Коновалов Г.В., Барахтин Б.К., Калинин Г.Ю., Фомина О.В.* Динамическая прочность азотосодержащей стали // *Materials Physics and Mechanics*. 2014. V. 21. P. 99–111.
11. *Терешкина И.А., Трунин И.Р., Симаков В.Г., Ткаченко М.И.* Способы определения значения откольной поврежденности // *ВАНТ ТПФ* 2016. № 4. С. 25–33.