

05

Временная зависимость откольной прочности в наносекундном диапазоне длительностей воздействия

© Ю.В. Петров,^{1,2} А.А. Уткин^{1,2}

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
198054 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: a.utkin51@gmail.com

(Поступило в Редакцию 28 ноября 2014 г.)

Рассмотрена задача откольного разрушения на основе критерия инкубационного времени. Обсуждены некоторые эффекты разрушения, наблюдаемые в ряде экспериментов. Установлено, что величина откольной прочности существенно зависит от параметров импульса, в частности от скорости спада нагрузки. Показано, что скоростная и временная зависимости откольной прочности могут быть рассмотрены не как функции материала, а как расчетные характеристики.

Введение

Явление откола возникает в материале в результате отражения волны сжатия от свободной границы. Напряжение в этой волне при отражении меняет знак и становится растягивающим. При этом суммарное напряжение в некоторых местах материала в некоторые моменты времени может стать растягивающим и вызвать разрушение.

Исторически первые попытки описания ударного разрушения связаны с применением критерия критического напряжения $\max \sigma(t) \leq \sigma_c$. Как показали опыты, этот подход не описывает многие существенные черты откольного разрушения, выражаемые временной зависимостью прочности и пространственным распределением разрушения [1]. В настоящее время динамическую прочность связывают, как правило, со скоростью деформирования в сечении откола, не принимая во внимание длительность действия нагрузки. Обнаруженные при проведении экспериментов эффекты зачастую не укладываются в общепринятую модель, что приводит к ее усложнению. Применение структурно-временного подхода при кратковременных воздействиях позволяет объяснить многие наблюдаемые в опытах эффекты, в частности увеличение прочности, и качественно описать характер зоны разрушения [2–4].

Рассмотрим результаты испытаний по определению откольной прочности алюминиевого сплава, описанные в [5,6]. В проведенных экспериментах наблюдались два основных режима деформирования исследуемого материала, приводящих к его разрушению. Авторы работ определяют их как динамический и квазистационарный. Качественно различие этих механизмов состоит в том, что в первом случае нагрузка в сечении откола линейно нарастает вплоть до момента разрушения, а во втором происходит быстрое растяжение материала с последующим его разрушением при почти постоянной нагрузке. При этом продолжительности участка роста и

постоянства напряжений сравнимы по величине. Когда реализуется динамический режим деформирования, откольную прочность можно связать со скоростью нагружения. В том же случае, когда режим деформирования квазистационарный, скорость деформирования в момент разрушения близка к нулю. В такой ситуации авторы связывают откольную прочность со временем, в течении которого материал в сечении откола находится в растянутом состоянии. Авторы считают, что оба механизма являются конкурирующими: реализуется тот из них, для которого при заданных условиях ударно-волнового нагружения образца момент откола наступает раньше.

1. Критерий инкубационного времени

Применение структурно-временного подхода позволяет объяснить наблюдаемые в опытах явления с единой позиции. Будем предполагать, что волна линейна, при ее движении не происходит никаких потерь. В этом случае напряжение в отраженной от свободной границы волне меняет знак на противоположный, а его величина не меняется. Критерий инкубационного времени был предложен в [2], а в случае изучения откола имеет вид [3–4]

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(s, x) ds < \sigma_c \tau, \quad (1)$$

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

Временем разрушения будем считать тот наименьший момент, при котором нарушилось критериальное соотношение (1). Координатой откольного сечения будет соответственно та координата, при которой это произошло. Время будем отсчитывать от начала отражения, а координату от свободной границы.

Критические характеристики разрушения в равной мере определяют продолжительность воздействия, форма и амплитуда приложенного импульса. При помощи критерия инкубационного времени определим связь скорости деформирования с другими характеристиками приложенного импульса.

2. Время и место разрушения

Одной из особенностей разрушения при динамическом нагружении является возможность приложения нагрузки, превышающей критическую, т.е. минимально необходимую для разрыва материала. Введем в рассмотрение понятие минимального разрушающего импульса. Пусть заданы форма воздействия (она может иметь вид равнобедренного или прямоугольного треугольника, трапеции, синуса и т.д.) и его продолжительность T . Форма воздействия на образец часто определяется характеристиками установки для проведения испытаний (это может быть, например, толщина ударника, емкость и индуктивность электрического зарядного устройства или мощность лазера). Назовем импульс данной формы, который приводит к разрушению, минимальным разрушающим, если убывание его величины за счет уменьшения амплитуды или продолжительности не будет вызывать разрушения. Если величина приложенного импульса больше минимально необходимой, то можно говорить о разрушении с перегрузкой.

Анализ разрушения импульсом в виде прямоугольного треугольника, имеющего только участок нагружения, был проведен в [4]. В таком импульсе скорость деформирования постоянна. Было установлено, что условие разрушения в случае коротких импульсов может наступить в двух сечениях одновременно. Были найдены координаты сечения откола, время его наступления и амплитуда в момент разрушения (т.е. откольная прочность). При этом время t_* возникновения условия разрушения

$$t_* = \frac{T + \tau + \Delta t}{2}, \tag{2}$$

координаты откольного сечения x_*

$$\frac{x_*}{c} = \begin{cases} \frac{T+\tau-\Delta t}{2}, & \frac{\Delta t+\tau-T}{2} & T \leq \tau, \\ \frac{T+\tau-\Delta t}{2} & T \geq \tau \end{cases} \tag{3}$$

и амплитуда в момент разрушения

$$P_* = \begin{cases} \nu \rho c^2 \Delta t, & \nu \rho^2 c T & T \leq \tau, \\ \nu \rho c^2 \Delta t & T \geq \tau. \end{cases} \tag{4}$$

Здесь ρ — плотность материала, c — скорость распространения волны, T — продолжительность приложенного импульса, ν — скорость деформации и

$$\Delta t = \tau \begin{cases} \sqrt{\frac{2\sigma_c}{\nu \rho c^2 \tau}}, & \nu \geq \frac{2\sigma_c}{\rho c^2 \tau}, \\ \frac{\sigma_c}{\nu \rho c^2 \tau} + \frac{1}{2}, & 0 < \nu \leq \frac{2\sigma_c}{\rho c^2 \tau}. \end{cases} \tag{5}$$

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы.

— Если продолжительность воздействия $T < \Delta t$, то разрушения не будет (приложенный импульс будет меньше минимального).

— Если продолжительность воздействия $T = \Delta t$, то нагружающий импульс будет минимальным разрушающим.

— В случае $T > \tau$ разрушающая амплитуда не зависит от продолжительности (и от величины перегрузки) и определяется скоростью воздействия.

— При $\Delta t < T \leq \tau$ условие разрушения наступает в двух точках одновременно. Амплитуда в одной из них не зависит от продолжительности воздействия. Во второй точке разрушающая амплитуда будет зависеть от времени действия приложенного импульса. Максимальное ее значение наступает при продолжительности $T = \tau$.

Если нагрузка имеет другую форму, то место и время разрушения могут измениться. При этом разрушение может произойти в момент времени, когда нагрузка будет уменьшаться.

3. Скоростная зависимость прочности

Как правило, динамическую прочность связывают со скоростью деформирования, не принимая во внимание длительность и форму действия нагрузки. Критические характеристики разрушения в равной мере определяют продолжительность воздействия, форма и амплитуда приложенного импульса. При помощи критерия инкубационного времени связь скорости деформирования с другими характеристиками приложенного импульса исследована в [4]. Кроме того, проведено сравнение расчета с экспериментальными данными, полученными в [5,6]. В экспериментах при изучении скоростной

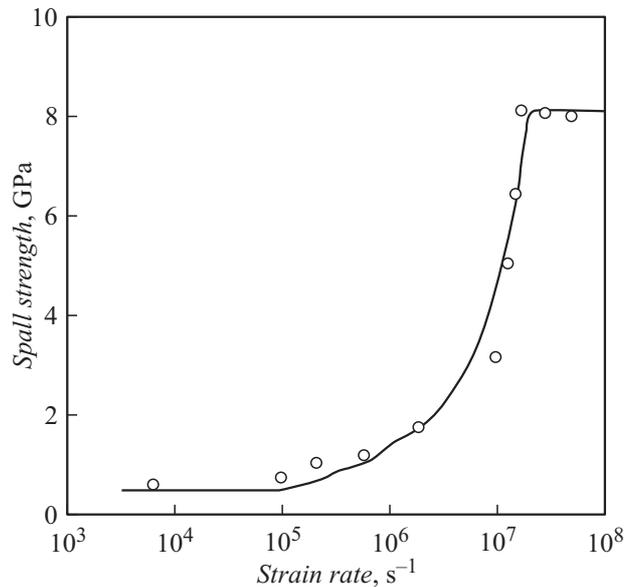


Рис. 1. Скоростная зависимость прочности.

зависимости прочности обнаружен эффект значительного роста и последующей стабилизации прочности. Авторы [5,6] связывают это явление с достижением теоретической прочности материала. При помощи критерия инкубационного времени этот эффект может быть получен за счет выбора формы нагружающего импульса и не связан с теоретической прочностью материала. Результаты расчетов приведены на рис. 1. Кругами изображены результаты эксперимента из [5,6].

4. Динамический и квазистационарный режимы деформирования

Используя критерий инкубационного времени, рассмотрим прикладываемый импульс в виде произвольного треугольника. Исследуем, как влияет форма этого импульса на место и время разрушения. Изучим, при каких условиях нагружения может возникнуть ситуация, при которой разрушение происходит после быстрого растяжения материала на участке с постоянной или уменьшающейся нагрузкой.

Заданная скорость нагружения определяет угол наклона треугольника на стадии роста нагрузки. Чтобы однозначно определить приложенную нагрузку, необходимо задать еще два параметра. Это могут быть, например, величина приложенного импульса, величина импульса, приложенного на участке нагружения, скорость спада нагрузки, амплитуда приложенного импульса, перегрузка импульса по отношению к минимальному разрушающему, отношение участка нагружения к участку спада нагрузки, продолжительность участка нагружения или спада нагрузки и т. д. Выбор двух параметров из перечисленных и скорость нагружения будут задавать треугольник, который характеризует нагружающий импульс. Не любые сочетания параметров могут определять приложенную нагрузку. Импульс может получиться меньше минимального разрушающего, и даже тупоугольным, что не имеет физического смысла.

Анализ разрушения при помощи критерия инкубационного времени показывает, что разрушение возможно не в момент достижения нагрузкой максимального зна-

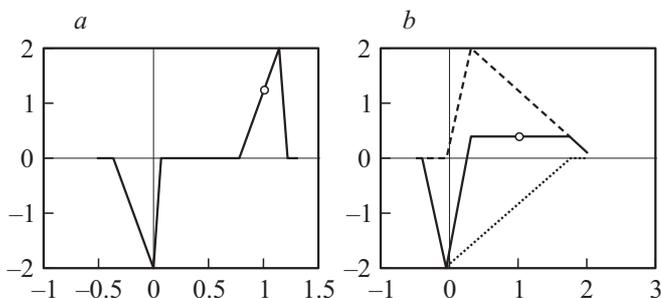


Рис. 2. Зависимость напряжения от времени в сечении откола. Напряжение и время нормированы. Пунктирная линия — напряжение в падающем импульсе, штриховая линия — в отраженном, сплошная линия — в суммарном.

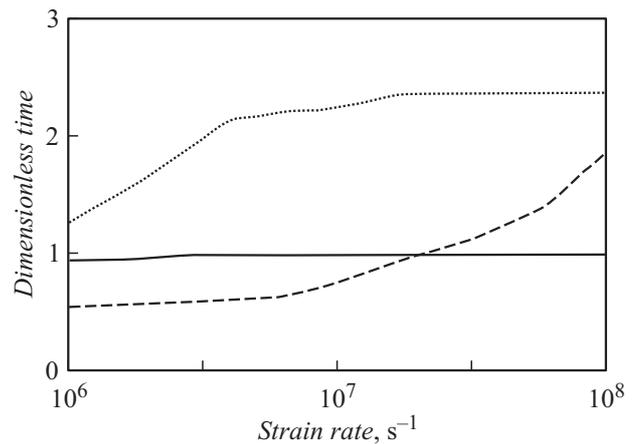


Рис. 3. Динамический и квазистационарный механизмы разрушения в зависимости от скорости.

чения, а некоторое время спустя, когда значение напряжений в сечении откола начинает уменьшаться. В этом случае связать прочность со скоростью деформирования уже не удастся. В данном случае можно говорить только о временной зависимости прочности. Такая ситуация в работах [5,6] называется квазистационарным механизмом разрушения. Зависимость напряжения от времени в сечении откола изображена на рис. 2. Было рассмотрено два импульса, имеющих одинаковые скорость деформирования и максимальную амплитуду и отличающихся скоростью спада нагрузки (рис. 2, *a, b*). Разрушение может наступать как на стадии роста локального напряжения, так и после достижения напряжением максимума, на стадии убывания нагрузки и даже на участке с постоянным значением напряжения, спустя некоторое время после достижения этого значения. Таким образом, согласно критерию инкубационного времени, каким будет механизм разрушения, квазистационарным или динамическим, определяется не скоростью деформирования, а соотношением параметров приложенного импульса, в данном случае продолжительностью участка спада нагрузки.

На рис. 3 по оси абсцисс откладывается скорость деформирования, а по оси ординат безразмерное время разрушения — отношение времени действия отраженного импульса от прихода в сечение откола до момента разрушения к продолжительности участка роста нагрузки в исходном падающем импульсе. Если эта величина не превосходит единицы, то разрушение происходит на участке роста нагрузки. В противном случае, чем больше безразмерное время отличается от единицы, тем больше „степень квазистационарности“. Здесь сплошной линией изображена зависимость времени разрушения от скорости нагружения импульсом, амплитуда которого на участке роста нагрузки превышает минимальную в 1.2 раза, а участок роста нагрузки в 5 раз продолжительнее участка ее спада. В этом случае наблюдается „динамический“ режим разрушения на всем

рассмотренном диапазоне скоростей деформирования. Точками — такой же импульс на участке роста, но участок спада нагрузки в 5 раз продолжительнее участка роста. Здесь, напротив, наблюдается „квзистационарный“ режим разрушения. И наконец, штрихами — разрушение нагрузкой, у которой постоянны скорость спада нагрузки ($36 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$) и величина приложенного импульса (72 Pa·s). В этом случае при увеличении скорости деформирования продолжительность участка роста нагрузки уменьшается, а участка спада увеличивается. В данном случае на небольших (до $10^{7.2} \text{ s}^{-1}$) скоростях деформирования наблюдается „динамический“ режим разрушения, а на скоростях выше — „квзистационарный“. На рис. 4 по оси ординат откладывается та же величина, что и на рис. 3 (отношение времени действия отраженного импульса от прихода в сечение откола до момента разрушения к продолжительности участка роста нагрузки в исходном падающем импульсе). По оси абсцисс — величина перегрузки импульса по сравнению с минимально необходимой для разрушения величиной. При этом приложенный импульс имеет участок спада нагрузки в 5 раз продолжительнее участка роста. Увеличение перегрузки при прочих равных условиях ведет к уменьшению „степени квазистационарности“. Немонотонный характер кривых связан с приходом и уходом падающей и отраженной волн на участке интегрирования. Таким образом, за то, каким будет „механизм разрушения“, „динамическим“ или „квзистационарным“, отвечают в первую очередь отношение продолжительностей участков роста и спада нагрузки приложенного импульса и величина перегрузки.

Отметим также, что и прочность при фиксированной скорости нагружения может изменяться в довольно больших пределах. На рис. 5 приведены значения прочности при фиксированной скорости деформирования в зависимости от „перегрузки“ для нагрузки, участок спада которой в 5 раз продолжительнее участка роста. Под перегрузкой понимается превышение минимальной необходимой для разрушения амплитуды за счет уве-

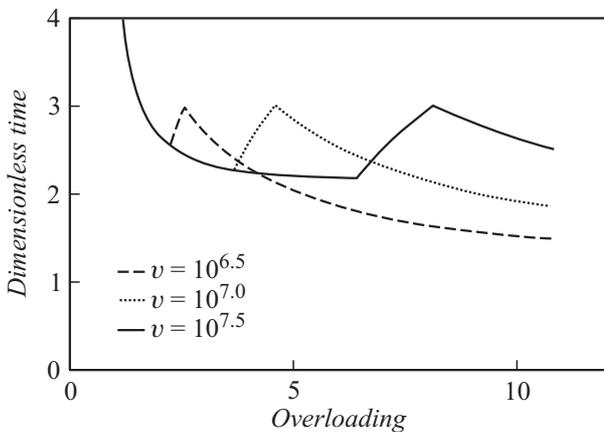


Рис. 4. Динамический и квазистационарный механизмы разрушения зависимость от величины перегрузки.

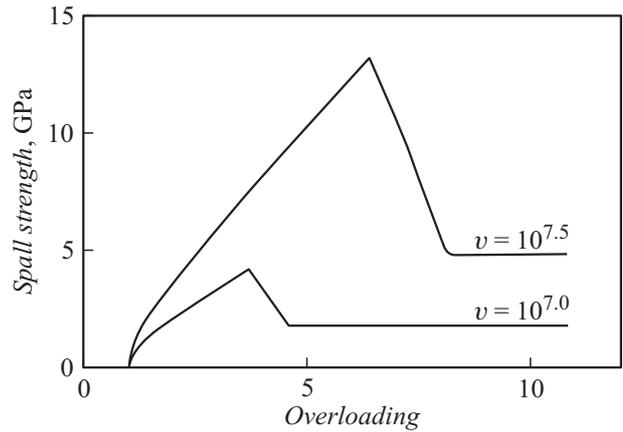


Рис. 5. Зависимость прочности от величины перегрузки.

личения длительности при сохранении скорости деформирования. Разрушающая амплитуда растет с увеличением перегрузки до некоторого максимума, начинает уменьшаться, а затем ее значение стабилизируется. Максимальное значение для разрушающей амплитуды наступает, если в момент разрушения падающая волна покидает сечение откола. Участок постоянной разрушающей амплитуды начинается при перегрузке, соответствующей уходу отраженной волны из сечения откола в момент времени $t_* - \tau$. Уменьшение и стабилизация разрушающей амплитуды вызваны увеличением продолжительности воздействия с ростом перегрузки до значения, превышающего величину инкубационного времени. В том случае, когда продолжительность роста нагрузки превышает время спада нагрузки, такого явления не наблюдается. Таким образом, прочность при заданной скорости, при изменении других параметров нагрузки может изменяться в довольно больших пределах. Поэтому построение скоростной зависимости прочности не может дать исчерпывающей информации о поведении материала при ударном воздействии.

5. Временная зависимость прочности

Зависимость прочности от продолжительности нагружения может быть построена при помощи критерия инкубационного времени. Критерий позволяет вычислить прочность независимо от того, растет нагрузка в сечении откола вплоть до момента разрушения или этому предшествует промежуток времени с постоянным или убывающим напряжением. Например, для импульсов в виде прямоугольного треугольника ее можно получить из (2)–(5).

Построим временную зависимость прочности в ситуации, когда реализуется квазистационарный механизм разрушения по терминологии авторов работ [5,6], и сравним полученную зависимость с результатами их испытаний. Примем следующие механические характеристики материала: $\sigma_c = 335 \text{ MPa}$, $c = 5100 \text{ m/s}$, $\rho = 2690 \text{ kg/m}^3$,

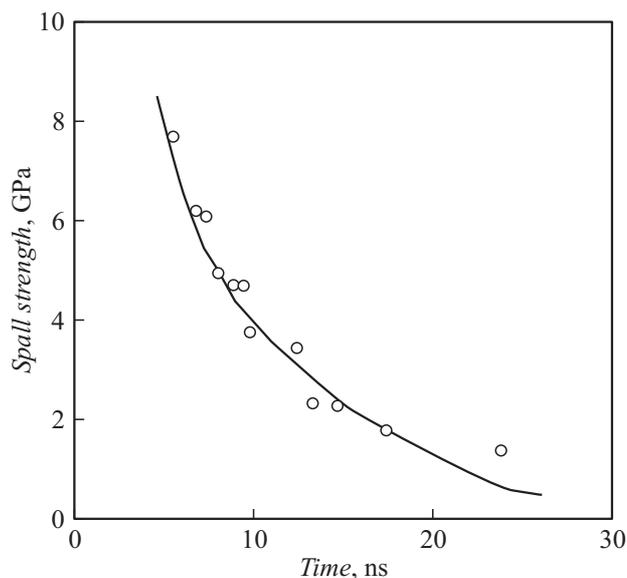


Рис. 6. Временная зависимость прочности.

$\tau = 30$ ns. Будем предполагать, что при проведении экспериментов, описанных в [5,6], выбранные параметры постоянны, но вообще они могут меняться с изменением скорости. Предположим, что длительность участка роста нагрузки в 5 раз короче участка ее спада. Таким образом, на всем диапазоне скоростей деформирования будет реализован квазистационарный механизм разрушения (рис. 3). Предположим также, что перегрузка приложенного импульса не зависит от скорости деформирования. Примем ее равной 6.4. На рис. 6 приведены результаты расчетов временной зависимости прочности. Кружки — результаты эксперимента. Параметры подбирались из условия близости к результатам эксперимента. Увеличение перегрузки приводит к перемещению расчетной кривой вверх, а уменьшение — вниз. Как видно, расчетная кривая хорошо описывает наблюдаемые экспериментальные результаты.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- применение для анализа разрушения критерия инкубационного времени позволяет получить наблюдаемые при экспериментах эффекты, не рассматривая два механизма разрушения,

- критерий инкубационного времени хорошо прогнозирует экспериментальные данные по отколу в наносекундном диапазоне длительностей воздействия,

- „динамическая“ прочность материала, если принять в качестве таковой растягивающее напряжение в момент разрушения, не является константой, а зависит от длительности импульса; таким образом, материал

может выдерживать любые напряжения, если они действуют в течение достаточно короткого времени.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-01-00598-а и 14-01-00814-а и гранта СПбГУ 6.38.243.2014.

Список литературы

- [1] Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск, Наука. 1979. 272 с.
- [2] Петров Ю.В., Уткин А.А. // ФХММ. 1989. № 2. С. 38–42.
- [3] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. // ДАН СССР. 1990. Т. 313. № 2. С. 276–279.
- [4] Petrov Y.V., Smirnov I.V., Utkin A.A. // Mech. Sol. 2010. Vol. 45 N 3. P. 476–484.
- [5] Батани Д., Вовченко В.И., Канель Г.И., Кильпио А.В., Красюк И.К., Ломоносов И.В., Пащинин П.П., Семенов А.Ю., Фортвов В.Е., Шашков Е.В. // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 3. С. 328–331.
- [6] Красюк И.К., Пащинин П.П., Семенов А.Ю., Фортвов В.Е. // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 7. С. 593–608.