

УДК 620.171+539.4.019

## ПРОЧНОСТЬ И УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТЕПЛОВОМ УДАРЕ

А. М. Молитвин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188 Саров

Получены временные зависимости откольной прочности и критической удельной энергии разрушения ряда металлов при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением ядерного взрыва. В условиях воздействия теплового удара долговечность металлов экспоненциально уменьшается с ростом амплитуды разрушающих напряжений. Критическая удельная энергия разрушения металлов при тепловом ударе возрастает с увеличением времени действия растягивающих напряжений. Показана необходимость учета геометрического фактора, что может привести к снижению порога разрушения и увеличению степени разрушения объекта, подвергнутого тепловому удару. Это происходит за счет кумуляции напряжений, возникновения кумулятивных выбросов материала, потери устойчивости при воздействии мощных потоков энергии на конусы, конические оболочки, диски и стержни.

Ключевые слова: разрушение металлов, тепловой удар, эксперимент, откольная прочность.

В последнее время интенсивно изучаются свойства материалов в условиях воздействия кратковременных импульсов лазерного, электронного, рентгеновского излучений, пучка ионов и т. д. (см., например, [1–12]). Подвод энергии при облучении осуществляется настолько быстро, что материал не успевает расширяться, в результате в нем возникают значительные сжимающие напряжения и происходит тепловой удар. Для снятия сжимающих напряжений материал расширяется в обоих направлениях, что эквивалентно распространению волн разрежения внутрь нагретого материала. При смыкании волн разрежения возникают растягивающие напряжения, которые могут вызвать откольные разрушения.

Характер деформирования материала при тепловом ударе значительно отличается от характера деформирования материала при ударно-волновом нагружении путем соударения пластин и взрыва конденсированного взрывчатого вещества на поверхности преграды из исследуемого материала [6]. В случае ударно-волнового нагружения материал вначале сжимается, переходя в более плотное по сравнению с исходным состояние, а затем расширяется в волнах разрежения. В идеализированном случае мгновенного и равномерного разогрева материала в нем генерируются сжимающие напряжения, при этом объем материала остается постоянным. Из этого состояния вещество расширяется (при наличии свободных поверхностей) до плотности меньше исходной. В рассматриваемых режимах нагружения значительно различаются также температуры материала. При ударном нагружении до десятков гигапаскалей приращение средней температуры сплошных металлов мало ( $100 \div 200$  К), а при тепловом ударе для разрушения, как правило, необходима температура, сравнимая с температурой плавления металла.

В подвергнувшихся тепловому удару оптически толстых образцах могут наблюдаться множественные отколы как на лицевой (обращенной к источнику излучения), так и на тыльной (теневой) стороне образца. Из анализа волновых процессов в плите и компактном цилиндре при поглощении электромагнитного излучения большой мощности [3] следует, что волновые процессы при тепловом ударе могут привести к кумуляции растягивающих напряжений, вследствие чего они могут в несколько раз превысить начальные сжимающие

напряжения. Учет данного фактора (кумуляции напряжений) невозможен при решении подобных задач в одномерной постановке.

Характерной особенностью откольного разрушения подвергшихся тепловому удару оптически тонких плоских образцов (при небольших градиентах энерговыделений) является расслоение их на две части. В этом случае критериальные характеристики порогов разрушения облученных образцов могут быть определены значительно точнее, чем в случае оптически толстых образцов.

Настоящая работа посвящена изучению закономерностей откольного разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе, инициированном кратковременным импульсом рентгеновского излучения ядерного взрыва. Исследование проводится с использованием кинетического и энергетического подходов к проблеме откольного разрушения твердых тел.

Экспериментальные данные по отколу получены в условиях импульсного облучения модельныхборок с металлическими образцами. Для расчетно-методического анализа результатов экспериментальных исследований использовались методики и программы ЭЛИЗА [13] и УП-ОК [14]. По первой определялись профили энерговыделений, по второй — характер волновых процессов и эволюция напряжений в различных сечениях подвергшихся тепловому удару образцов.

Каждая модельная сборка содержала несколько установленных одна за другой перпендикулярно направлению облучения металлических фольг, изолированных от механического влияния разлета соседних фольг оптически прозрачными демпферами. Поток энергии рентгеновского излучения ослаблялся дозирующими фильтрами, поглощавшими мягкую часть спектра рентгеновского излучения. Введение в конструкцию пробки-демпфера из пористого пенопласта позволило получать информацию и в условиях интенсивного разрушения дозирующего фильтра. С целью наблюдения “чистого” откола в экспериментах исключены процессы испарения и плавления вещества фольг.

Исследовались фольги из меди (М1, М1Т, М1М), никеля (НП2, НП2М), титана (ВТ1-0), латуни (Л62, Л63), бронзы (БрБ2, БрБ2М), молибдена (МЧ-1), вольфрама, тантала (ТЧ), кадмия, свинца, цинка, серебра и девяти марок конструкционных сталей (Ст.8, Ст.10, Х18Н10Т, 36НХТЮ, 42НХТЮ, 50НХС, 80НХС, 65Г, 60С2А) толщиной от 0,005 до 1 мм. Диаметр фольг (10–16 мм) был выбран достаточно большим по сравнению с их толщиной, чтобы в центральной части фольг отсутствовало влияние боковой разгрузки. Лицевая и тыльная поверхности фольг были свободны, что позволило рассматривать процессы откольного разрушения в одномерном приближении.

При тепловом ударе откольное разрушение металлических фольг происходило при температурах, близких к соответствующим температурам плавления вещества в нормальных условиях. Градиенты энерговыделений в большинстве фольг невелики. Данные о степени неравномерности разогрева фольг и крутизне фронта импульса напряжений содержатся в работе [6].

При проведении расчетов по программе УП-ОК использовалось двучленное уравнение состояния вещества в форме Ми — Грюнайзена, учитывались упругопластические свойства металлов и сплавов и длительность импульса рентгеновского излучения. Каждый образец в зависимости от толщины разбивался на определенное число частей (от 10 до 200), в каждой из которых рассчитывались амплитуды растягивающих напряжений и времена их действия.

Отождествляя полное время действия растягивающих напряжений в сечении откола в первой волне разгрузки поперек образца с долговечностью материала  $\tau$ , а амплитуду разрушающих напряжений с откольной прочностью материала  $\sigma$ , после систематизации расчетно-экспериментальных данных получим временную зависимость откольной прочности материала при тепловом ударе.

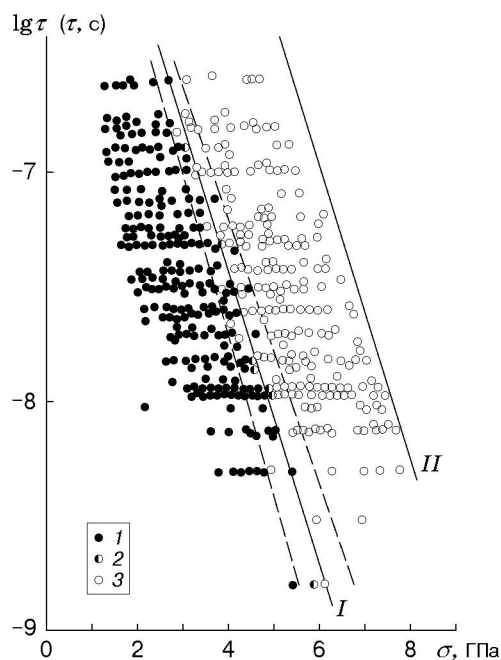


Рис. 1. Временные зависимости откольной прочности меди при тепловом ударе (*I*) и ударном нагружении (*II*):  
 1 — отсутствие видимого разрушения, 2 — зарождение откола (начало видимого разрушения), 3 — откол или полное разрушение образца

Результаты обработки экспериментальных данных по откольному разрушению меди при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением ядерного взрыва, приведены на рис. 1. Сплошной линией *I* показана наиболее вероятная граница откольного разрушения меди, отождествляемая с динамической ветвью долговечности меди при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением. Она отделяет область разрушения меди при тепловом ударе от области, в которой медь еще сохраняет видимую целостность. Штриховыми линиями показана область, в которой может находиться граница откольного разрушения меди из-за погрешности в определении напряжений. Линией *II* на рис. 1 показана динамическая ветвь долговечности меди, полученная в [15] методом соударения пластин. Различие положений линий *I* и *II* обусловлено как уменьшением откольной прочности меди с ростом температуры, так и отмеченными выше особенностями процессов деформирования меди при тепловом ударе по сравнению с режимом соударения пластин. При нагружении меди путем соударения пластин она сначала сжимается волной давления, а затем после прихода волны разгрузки происходит растяжение. При тепловом ударе фаза сжатия отсутствует, а давление возникает только за счет разогрева меди рентгеновским излучением. Вследствие этого одинаковые растягивающие напряжения в меди возникают при различной степени ее деформирования.

На рис. 2 приведены полученные в работах [6–11] временные зависимости откольной прочности металлов и сплавов в условиях воздействия кратковременного импульса рентгеновского излучения ядерного взрыва. Из полученных результатов следует, что в интервале времени  $10^{-6} \div 10^{-9}$  с долговечность металлов и сплавов в условиях воздействия теплового удара экспоненциально уменьшается с ростом амплитуды разрушающих напряжений, что соответствует кинетической концепции образования откола.

Для анализа экспериментальных данных по откольному разрушению металлов и сплавов при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением ядерного взрыва, может быть использована модель кинетики откольного разрушения [7, 15], связывающая амплитуду разрушающих напряжений  $\sigma$  и время их действия  $\tau$  соотношением

$$\sigma = (U_0 - AkT \ln(\tau/\tau_0))/(\gamma\Omega),$$

где  $\Omega$  — атомный объем;  $U_0$  — энергия сублимации атомов решетки;  $T$  — эффективная

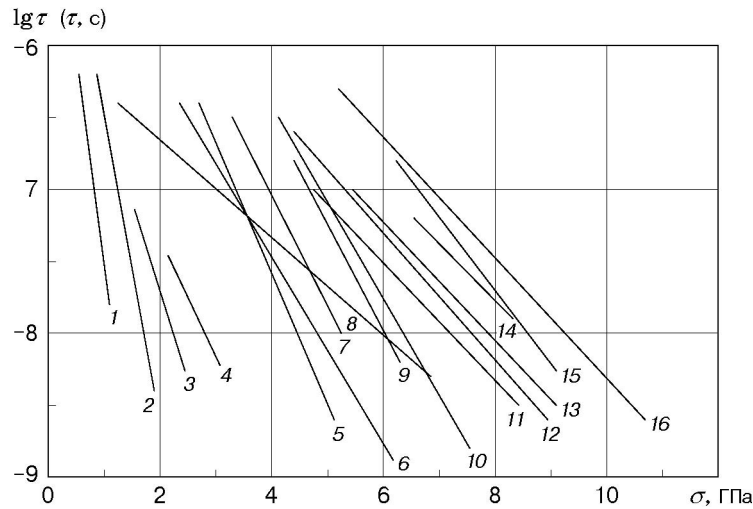


Рис. 2. Временные зависимости откольной прочности металлов и сплавов при тепловом ударе:

1 — свинец, 2 — кадмий, 3 — цинк, 4 — серебро, 5 — латунь, 6 — медь, 7 — бронза, 8 — молибден, 9 — титан, 10 — сталь (Ст.10), 11 — вольфрам, 12 — никель, 13 — сталь (X18H10T, 36НХТЮ, 42НХТЮ, 50НХС, 80НХС), 14 — сталь (65Г, 60С2А), 15 — сталь (Ст.8), 16 — тантал

температура;  $k$  — постоянная Больцмана;  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\tau_0$  — параметры модели, приведенные в работах [6–10].

Наряду с кинетическим подходом к проблеме откольного разрушения твердых тел, в соответствии с которым откол рассматривается как протекающий во времени процесс, интенсивно развивается энергетический подход, основанный на сопоставлении запаса энергии в образце и работы разрушения [8–11, 16, 17].

Необходимое условие сохранности конструкции запишем в простейшем виде

$$\int_V \xi dV < \int_S \lambda dS,$$

где  $\xi$  — упругая энергия единицы объема;  $\lambda$  — удельная (на единицу поверхности) работа прохождения трещины разрыва;  $V$  — объем объекта;  $S$  — площадь поверхности разрушения.

Полагая, что работа разрушения происходит только за счет запаса упругой энергии растяжения откальзывающейся пластины, авторы работы [16] записывают условие откола в следующем виде:

$$\int_0^h \sigma^2 dx = \frac{2\lambda E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (1)$$

где  $h$  — длина нагружающего импульса;  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\lambda$  — удельная (на единицу поверхности) работа отрыва материала.

Согласно [16] откол происходит, когда запас упругой энергии в волне растяжения оказывается равным работе отрыва материала. Координата образования откола, т. е. толщина откольного слоя, определяется сечением, в котором условие (1) выполняется раньше, чем во всех остальных.

Использование энергетического подхода [16], основанного на сопоставлении запаса энергии в образце и работы разрушения, а также методики и программы УП-ОК позволило оценить критическую удельную энергию разрушения материала, необходимую для

совершения работы отрыва (разделения на части подвергнувшегося воздействию теплового удара плоского металлического образца). При проведении расчетов параметр  $\lambda$  в уравнении (1) варьировался и изучалось его влияние на целостность подвергнувшихся тепловому удару образцов из меди, никеля, титана, латуни, бронзы, стали (марки Ст.10), вольфрама, тантала, молибдена и кадмия толщиной от 0,005 до 1 мм, результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными по отколу. Особый интерес представляло получение зависимости критической удельной энергии разрушения  $\lambda_*$  от времени  $\tau$  действия растягивающих напряжений в сечении откола.

Согласование экспериментальных данных по откольному разрушению металлических фольг при тепловом ударе с результатами расчетов по программе УП-ОК с использованием энергетического критерия разрушения (1) оказалось возможным при учете зависимости удельной энергии разрушения от времени действия растягивающих напряжений в сечении откола. Временную зависимость критической удельной энергии разрушения меди, никеля, титана, латуни, бронзы, стали (марки Ст.10), вольфрама, тантала, молибдена и кадмия при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением ядерного взрыва, можно представить в виде

$$\lambda_* = \alpha\tau(\beta + \lg \Theta)^2, \quad (2)$$

где  $\Theta$  — безразмерная величина, равная  $\tau$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  — параметры материала, приведенные в работах [8–11].

Полученные в [8–11] временные зависимости критической удельной энергии разрушения ряда материалов приведены на рис. 3. На рис. 4 представлены результаты расчетов критической удельной энергии разрушения меди, необходимой для совершения работы отрыва.

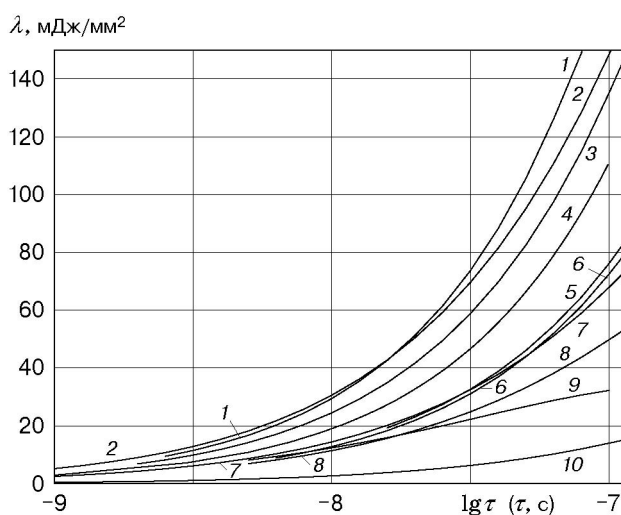


Рис. 3

Рис. 3. Временные зависимости критической удельной энергии разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе:

1 — титан, 2 — никель, 3 — тантал, 4 — сталь (Ст.10), 5 — бронза, 6 — латунь, 7 — медь, 8 — вольфрам, 9 — молибден, 10 — кадмий

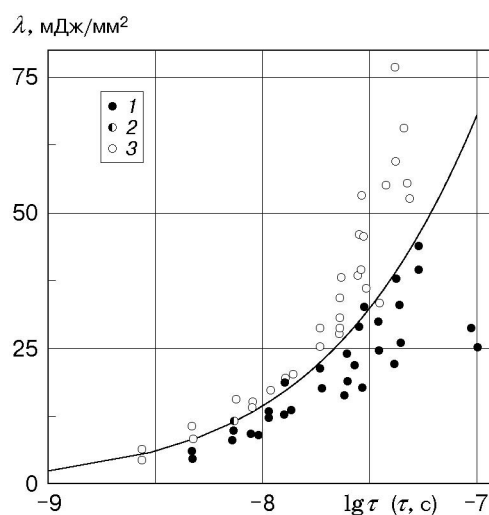


Рис. 4

Рис. 4. Временная зависимость критической удельной энергии разрушения меди при тепловом ударе:

1 — отсутствие видимого разрушения, 2 — зарождение откола (начало видимого разрушения), 3 — откол или полное разрушение образца; линия — расчет по формуле (2)



1 2 3 4 5

Рис. 5. Результат воздействия теплового удара на сплошные конусы из алюминиевого сплава Д16Т с различными углами раствора:

1 — 62°; 2 — 27°; 3 — 14°; 4 — 7°; 5 — 5°

Полученные результаты показывают, что критическая удельная энергия разрушения металла, необходимая для совершения работы отрыва (разделения на части подвергнутого воздействию теплового удара плоского металлического образца), не является константой для данного металла. Критическая удельная энергия разрушения меди, никеля, титана, латуни, бронзы, стали (марки Ст.10), вольфрама, тантала, молибдена и кадмия зависит от условий нагружения и возрастает с увеличением времени действия растягивающих напряжений в сечении откола, что согласуется с данными работ [16, 17].

При прогнозировании стойкости элементов и узлов импульсных энергетических и облучательных установок к разрушающему действию интенсивных потоков энергии проникающего излучения необходимо учитывать возможность проявления геометрического фактора при тепловом ударе. В работе [12] показано, что учет геометрического фактора может привести к снижению порога разрушения и увеличению степени разрушения объекта за счет кумуляции напряжений, возникновения кумулятивных выбросов материала, потери устойчивости при импульсном воздействии потоков энергии рентгеновского излучения на конусы, конические оболочки, диски и стержни. Так, кумуляция напряжений в конических оболочках может привести не только к кумулятивному выбросу из тыльной (теневой) вершины конической оболочки, но и к ее объемному разрушению, вследствие чего вершина конуса приобретает зубчатую форму. Результат воздействия теплового удара на сплошные конусы показан на рис. 5 (оси конусов совпадают с направлением облучения). Следствием теплового удара являются изгиб и частичное разрушение конца остроконечной конической иглы 5 высотой 13,74 см, практически полное разрушение конуса 1 высотой 1 см и сильное разрушение с расщеплением верхней части конуса 2 высотой 2,5 см. При этом степень разрушения конусов 3 и 4 незначительна. С уменьшением угла раствора конуса эффект кумуляции напряжений и степень разрушения конусов уменьшаются. Увеличение флюенса энергии рентгеновского излучения приводит к более сильному проявлению эффекта кумуляции напряжений и увеличению вследствие этого степени разрушения конических образцов.

Полученные закономерности разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением ядерного взрыва, могут быть использованы при проектировании и разработке элементов и узлов новых импульсных энергетических и облучательных установок, при разработке методов проведения экспериментов на моделирующих установках, а также для дальнейшего исследования прочности твердых тел.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Eliezer S., Gilath I., Bar-Noy T.** Laser-induced spall in metals: Experiment and simulation // J. Appl. Phys. 1990. V. 67, N 2. P. 715–724.
2. **Физика ядерного взрыва:** В 2 т. Т. 2. Действие взрыва. М.: Наука. Физматлит, 1997.
3. **Аптуков В. Н.** Деформирование и разрушение плиты при тепловом ударе // Пробл. прочности. 1987. № 12. С. 82–87.
4. **Бонюшкин Е. К., Глушак Б. Л., Завада Н. И. и др.** Закономерности откольного разрушения металлов в режиме быстрого объемного разогрева в субмикро- и в субнаносекундном диапазонах долговечности // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 6. С. 105–115.
5. **Голубев В. К., Рабинович К. Г., Чернышев А. К.** О характере разрушения медной фольги при интенсивном рентгеновском облучении // Журн. техн. физики. 1998. Т. 68, № 2. С. 116, 117.
6. **Молитвин А. М., Борин И. П., Босамыкин В. С.** Долговечность меди, никеля, титана, латуни и бронзы при импульсном облучении // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 6. С. 116–121.
7. **Борин И. П., Босамыкин В. С., Молитвин А. М.** Долговечность меди и ее сплавов при импульсном электромагнитном воздействии // Физика металлов и металловедение. 1996. Т. 81, вып. 5. С. 170–175.
8. **Молитвин А. М., Борин И. П.** О закономерностях откольного разрушения металлов при тепловом ударе // Металлы. 1998. № 3. С. 93–98.
9. **Молитвин А. М.** О кинетическом и энергетическом подходах к описанию откольного разрушения меди и никеля при тепловом ударе // Металлы. 2001. № 3. С. 101–108.
10. **Молитвин А. М.** О кинетическом и энергетическом подходах к описанию откольного разрушения конструкционных сталей при тепловом ударе // Металлы. 2002. № 4. С. 66–71.
11. **Молитвин А. М.** О прочности и удельной энергии разрушения металлов при тепловом ударе // Физика экстремальных состояний вещества — 2002 / Под ред. В. Е. Фортова и др. Черноголовка: Ин-т пробл. хим. физики РАН, 2002. С. 121–123.
12. **Молитвин А. М., Борин И. П., Босамыкин В. С.** Некоторые геометрические эффекты при термомеханическом разрушении металлических образцов в условиях импульсного облучения // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 5. С. 162–167.
13. **Донской Е. Н.** Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса  $\gamma$ -излучения, электронов и позитронов // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.
14. **Иванова Г. Г., Гаврилов Н. Ф., Селин В. И., Софронов В. Н.** Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы числ. решения задач мат. физики. 1982. Вып. 3. С. 11–14.
15. **Борин И. П., Новиков С. А., Погорелов А. П., Синицын В. А.** О кинетике разрушения металлов в субмикросекундном диапазоне долговечности // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266, № 6. С. 1377–1380.
16. **Иванов А. Г., Минеев В. Н.** О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций // Докл. АН СССР. 1975. Т. 220, № 3. С. 575–578.
17. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др.** Масштабный эффект при динамическом разрушении (отколе) хрупких и вязких материалов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 108–114.