

ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.М.Молитвин

Российский Федеральный Ядерный Центр–ВНИИЭФ, Институт ядерной и радиационной физики. (607188, Россия, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, дом 37, РФЯЦ–ВНИИЭФ, ИЯРФ). Факс (831–30) 455–69. E-mail: a-molitvin@expd.vniief.ru

В работе рассмотрены два типа закономерностей откольного разрушения металлов и сплавов в условиях интенсивного рентгеновского облучения. В рамках кинетического подхода к проблеме откольного разрушения твёрдых тел найдены временные зависимости откольной прочности свинца, кадмия, цинка, серебра, меди, латуни, бронзы, никеля, титана, молибдена, вольфрама, тантала и некоторых конструкционных сталей при тепловом ударе. В рамках энергетического подхода к проблеме откола найдены временные зависимости критической удельной энергии разрушения меди, латуни, бронзы, никеля, титана, молибдена, вольфрама, тантала и кадмия в условиях воздействия рентгеновского излучения.

Введение

Создание разнообразных энергетических и облучательных установок способствовало интенсивному изучению механических свойств материалов в условиях воздействия мощных потоков излучения: электронного, рентгеновского, лазерного, пучка ионов и т.д. Многочисленными группами исследователей изучаются такие явления, как поверхностное и глубинное упрочнение металлов и сплавов при облучении, генерация упругих и ударных волн, разрушение материалов при тепловом ударе и т.д.

Интерес к исследованиям разрушения материалов при тепловом ударе (см., например, [1–15] и библиографию к ним) в значительной степени обусловлен тем обстоятельством, что напряжения, возникающие при тепловом ударе, могут привести к разрушению элементов и узлов самих энергетических и облучательных установок. Исследования процессов откольного разрушения материалов при тепловом ударе представляют значительный научный интерес и для теории разрушения твёрдых тел, дополняя и качественно расширяя банк имеющихся данных по откольному разрушению твёрдых тел при традиционном ударно-волновом нагружении методами соударения пластин и взрыва конденсированного взрывчатого вещества.

В докладе обсуждаются излагавшиеся ранее в [7–12] два типа закономерностей откольного разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением, позволяющих описать процесс откола при тепловом ударе в рамках широко обсуждаемых в литературе кинетического и энергетического подходов к проблеме откольного разрушения твёрдых тел.

Основная часть

Исследования проводились с использованием методики определения порогов разрушения плоских металлических образцов в условиях воздействия интенсивных потоков рентгеновского излучения, предполагающей получение экспериментальных данных по отколу путём импульсного облучения модельныхборок с образцами (фольгами) и использующей для

расчётно-методического сопровождения экспериментальных исследований методики и программы ЭЛИЗА [16] и УП–ОК [17]. По первой из них определялись профили энерговыделений, а по второй – характер волновых процессов (с учётом упругопластических свойств металлов и сплавов) и эволюция напряжений в различных сечениях подвергшихся тепловому удару образцов (в том числе амплитуды и времена действия растягивающих напряжений).

Импульсному рентгеновскому облучению подвергались сборки с последовательно расположенными образцами (фольгами) из исследуемых металлов и сплавов. Поток энергии рентгеновского излучения ослаблялся до нужной величины дозирующими фильтрами, интенсивно поглощавшими мягкую часть спектра рентгеновского излучения.

В качестве испытуемых образцов использовались 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, сталей (Ст08, Ст10, 65Г, 60С2А, Х18Н10Т, 36НХТЮ, 42НХТЮ, 50НХС, 80НХС) толщиной от 0.005 до 1мм. Диаметр образцов (10–16мм) был выбран достаточно большим по сравнению с их толщиной, чтобы в центральной части образцов не сказывалось влияние боковой разгрузки, а лицевая (обращённая к источнику рентгеновского излучения) и тыльная (теневая) поверхности образцов были свободны, что позволило рассматривать процессы откольного разрушения в одномерном приближении.

Откольное разрушение подвергшихся тепловому удару металлических фольг происходило при температурах, близких к соответствующим температурам плавления вещества. Градиенты энерговыделений в большинстве металлических фольг были невелики [7].

Найденные в работах [7–11] временные зависимости откольной прочности свинца, кадмия, цинка, серебра, латуни, меди, бронзы, молибдена, титана, вольфрама, никеля, сталей (Ст10, Ст08, Х18Н10Т, 36НХТЮ, 42НХТЮ, 50НХС, 80НХС, 65Г, 60С2А) и тантала в условиях интенсивного рентгеновского облучения

результаты свидетельствуют о том, что в диапазоне времён от $\sim 10^{-6}$ с до $\sim 10^{-9}$ с долговечность τ металлов и сплавов в условиях воздействия теплового удара экспоненциально убывает с ростом амплитуды разрушающих напряжений (откольной прочности материала σ), что соответствует кинетической концепции образования откола.

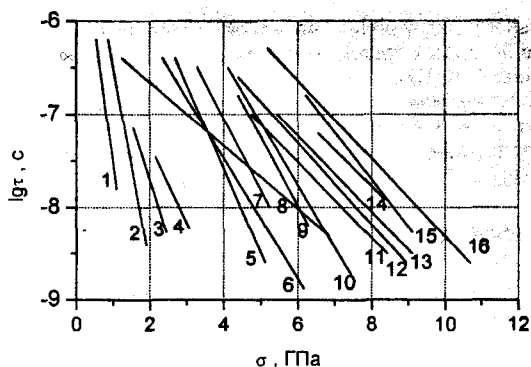


Рис.1. Временные зависимости откольной прочности свинца (1), кадмия (2), цинка (3), серебра (4), латуни (5), меди (6), бронзы (7), молибдена (8), титана (9), стали Ст10 (10), вольфрама (11), никеля (12), сталей X18N10T, 36NХТЮ, 42NХТЮ, 50NХС и 80NХС (13), сталей 65Г и 60С2А (14), стали Ст08 (15) и тантала (16).

Для описания данных по откольному разрушению исследованных металлов и сплавов при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением, была использована модель кинетики откольного разрушения [8,18], связывающая амплитуду разрушающих напряжений (откольную прочность σ) и время их действия (долговечность τ) соотношением:

$$\sigma = \frac{1}{\gamma\Omega} (U_0 - AkT \ln \frac{\tau}{\tau_0}), \quad (1)$$

где Ω – атомный объем; U_0 – энергия сублимации атомов решётки; T – эффективная температура; k – постоянная Больцмана; A , γ , τ_0 – параметры модели, указанные в работах [7–11].

Наряду с кинетическим подходом к проблеме откольного разрушения твёрдых тел при импульсном нагружении, рассматривающим откол как протекающий во времени процесс, интенсивно развивается и энергетический подход, основанный на сопоставлении запаса энергии в образце и работы разрушения.

Полагая, что работа разрушения происходит только за счет запаса упругой энергии растяжения откалываемой пластины, авторы работ [19,20] записывают условие откола в следующем виде:

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

где h – длина нагружающего импульса; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; λ – удельная на единицу поверхности работа отрыва материала.

Откол происходит тогда, когда запас упругой энергии в волне растяжения оказывается равным работе на отрыв материала. Координата образования откола, т.е. толщина откольного слоя, определяется сечением, где ранее всего выполняется условие (2).

В рамках такого энергетического подхода к проблеме откольного разрушения твёрдых тел были проведены расчёты удельной энергии разрушения материала λ , необходимой для совершения работы отрыва материала, разделения на части подвергшихся тепловому удару плоских образцов из меди, никеля, титана, латуни, бронзы, молибдена, вольфрама, тантала и кадмия толщиной от 0.01 до 1 мм.

Согласование экспериментальных данных по откольному разрушению металлических фольг при тепловом ударе с результатами расчётов по методике и программе УП–ОК с использованием энергетического критерия разрушения (2) оказалось возможным только при учёте зависимости удельной энергии разрушения материала λ от времени τ действия растягивающих напряжений в сечении откола. Сделанные оценки показали, что временная зависимость критической удельной энергии разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе можно описать выражением:

$$\lambda_* = \alpha\tau(\beta + \lg \Theta)^2, \quad (3)$$

где $\Theta = \tau(c)/lc$ – безразмерная величина, численно равная τ ; α и β – параметры материала, указанные в работах [9,10,12].

Найденные в работах [9,10,12] временные зависимости критической удельной энергии разрушения меди, никеля, титана, латуни, бронзы, молибдена, вольфрама, тантала и кадмия нанесены на рис.2 линиями 1–9.

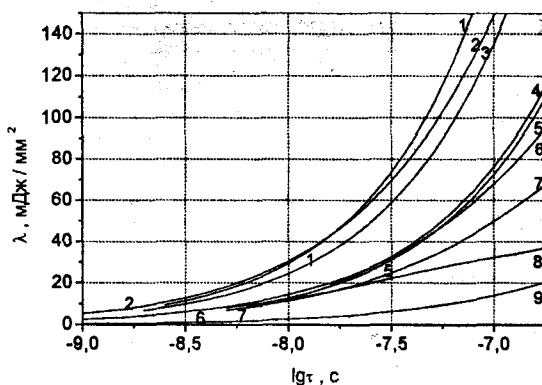


Рис.2. Временные зависимости критической удельной энергии разрушения титана (1), никеля (2), тантала (3), бронзы (4), латуни (5), меди (6), вольфрама (7), молибдена (8) и кадмия (9) при тепловом ударе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что критическая удельная энергия разрушения материала, необходимая для совершения работы отрыва материала, разделения на части подвергшегося воздействию

теплого удара плоского металлического образца, не является константой материала. Критическая удельная энергия разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе зависит от условий нагружения, возрастает с ростом времени действия растягивающих напряжений в сечении откола, что согласуется с выводами работ [19–21] по традиционному ударно-волновому нагружению твёрдых тел.

В работе [21] для объяснения масштабных эффектов при динамическом разрушении (отколе) хрупких и вязких материалов была предложена зависимость вида

$$\lambda = \lambda_0 (\tau / \tau_0)^m, \quad (4)$$

где $m \sim 0.5-0.8$.

Нетрудно заметить, что в исследованном диапазоне долговечности выражение (3) не так уж сильно отличается от выражения (4). Так, например, в интервале изменения τ от $\tau \sim 10^{-9}$ с до $\tau \sim 10^{-7}$ с линия 2 на рис. 2 может быть приближённо описана выражением $\lambda_c \sim (\tau / \tau_0)^{0.73}$, линия 6 – выражением $\lambda_c \sim (\tau / \tau_0)^{0.7}$. Гораздо более существенными могут оказаться различия в величине параметра λ_0 в выражении (4) при тепловом ударе и традиционном ударно-волновом нагружении, поскольку пути деформирования материала при тепловом ударе весьма существенно отличаются от путей деформирования материала при традиционном ударно-волновом нагружении методами соударения пластин и взрыва конденсированного взрывчатого вещества [7–9]. Значительную роль будут играть и различия в температуре образцов при тепловом ударе и традиционном ударно-волновом нагружении.

Различиями в путях деформирования металлов и сплавов при тепловом ударе и традиционном ударно-волновом нагружении, а также уменьшением откольной прочности металлов и сплавов с ростом температуры обусловлены и имеющиеся значительные расхождения в положениях динамических ветвей долговечности металлов и сплавов при тепловом ударе и традиционном ударно-волновом нагружении [7–9].

Прогнозируя стойкость элементов и узлов импульсных энергетических и облучательных установок к разрушающему действию интенсивных потоков энергии проникающего излучения, необходимо иметь в виду, что это прогнозирование может оказаться недостаточно корректным и привести к ошибочным выводам, если не учитывать вероятность проявления геометрических эффектов. В работе [13] показано, что геометрические эффекты могут приводить к снижению порога разрушения и увеличению степени разрушения облучаемого объекта за счёт кумуляции напряжений, возникновения кумулятивных выбросов материала, потери устойчивости при импульсном воздействии мощных потоков проникающего излучения на конусы, конические оболочки, диски и стержни.

Заключение

Найденные закономерности откольного разрушения металлов и сплавов при тепловом ударе, инициированном рентгеновским излучением, могут быть использованы при проектировании и разработке элементов и узлов новых импульсных энергетических и облучательных установок, при проработке методологии экспериментов на моделирующих установках, а также для дальнейшего развития учения о прочности твёрдых тел при импульсном нагружении. Их было бы целесообразно использовать и для дальнейшего развития предложенного в [20] феноменологического двухстадийного энергетического подхода к проблеме разрушения твёрдых тел с целью разработки такой модели разрушения, которая одновременно рассматривала бы как чисто кинетический подход к проблеме разрушения, так и чисто энергетический подход, существенно дополняющие друг друга.

Список литературы

1. *Eliezer S., Gilath I., Bar-Noy T.* // J. Appl. Phys. - 1990. - V.67. - N.2. - P.715.
2. *Boustie M., Cottet F.* // J. Appl. Phys. - 1991. - V.69. - N.11. - P.7533.
3. *Oswald R.B., Schallhorn D.R., Eisen H.A., Mc Lean F.B.* // Appl. Phys. Let. - 1968. - 13. - N.8. - P.279.
4. *Галиев Ш.У.* Нелинейные волны в ограниченных сплошных средах. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 262с.
5. *Высокоэнергетическая электроника твёрдого тела / Вайсбурд Д.И., Семин Б.Н., Таванов Э.Г. и др.* - Новосибирск: Наука, 1982.-227с.
6. *Бонюшкин Е.К., Глушак Б.Л., Завада Н.И. и др.* // Прикл. мех. и технич. физика. - 1996.- Т.37.- № 6.- С.105.
7. *Молитвин А.М., Борин И.П., Босамыкин В.С.* // Прикл. механика и технич. физика.- 1996.- Т.37.- №6.- С.116.
8. *Борин И.П., Босамыкин В.С., Молитвин А.М.* // Физ. металлов и металловедение. -1996.-Т.81.-Вып.5.- С.170.
9. *Молитвин А.М., Борин И.П.* // Металлы. - 1998.- №3.- С.93.
10. *Молитвин А.М.* // Радиационная физика твёрдого тела: Труды X международного совещания. - М., НИИ ПМТ при МГИЭМ (ТУ), 2000. - С.362.
11. *Молитвин А.М., Борин И.П.* // Радиационная физика твёрдого тела: Труды X международного совещания.- М., НИИ ПМТ при МГИЭМ (ТУ), 2000. - С.567.
12. *Молитвин А.М.* // Радиационная физика твёрдого тела: Труды XI международного совещания. - М., НИИ ПМТ при МГИЭМ (ТУ), 2001.
13. *Молитвин А.М., Борин И.П., Босамыкин В.С.* // Прикл. мех. и технич. физика. - 1996.- Т.37.- №5.- С.162.
14. *Голубев В.К., Рабинович К.Г. и др.* // Прикладная механика и техническая физика.-1997.-Т.38.-№1.- С.140.
15. *Воробьев С.А., Лопатин В.С., Погребняк А.Д. и др.* // Журнал технической физики.-1985.-Т.55.-Вып.6.- С.1237.
16. *Донской Е.Н.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. - 1993.- Вып.1.- С.3.

17. Иванова Г.Г., Гаверилов Н.Ф. и др. // ВАИТ. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики. - 1982.- Вып.3(11).- С.11.
18. Борин И.П., Новиков С.А., Погорелов А.П., Синицын В.А. // Доклады АН СССР.- 1982.- Т.266.- №6.- С.1377.
19. Иванов А.Г. // Физика горения и взрыва. - 1975.- Т.11.- №3.- С.475.
20. Иванов А.Г., Минеев В.Н. // Доклады АН СССР.- 1975.- Т.220.- №3.- С.575.
21. Огородников В.А., Иванов А.Г., Лучинин В.И. и др. // Физика горения и взрыва. - 1999.- Т.35.- №1.- С.108.

SPALLING FRACTURE OF METALS AND ALLOYS UNDER INTENSE X-RADIATION

A.M.Molitvin

*Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF, Institute of Nuclear and Radiation Physics
(607188, Russia, Nizhni Novgorod region, Sarov, Mira Ave., 37, RFNC-VNIIEF, INRP)
Fax (831-30) 455-69. E-mail: a-molitvin@expd.vniief.ru*

Creation of different power and irradiating installations assisted in studying mechanical properties of structural materials under the effect of high-power radiation fluxes: laser, electron, X-ray, ion beam etc. There are being widely investigated such phenomena as surface and deep hardening of metals and alloys under irradiation, generation of elastic and shock waves, materials failure under thermal shock etc.

In the paper there are discussed the results of long researches of spalling fracture of materials and alloys under intense X-radiation. Model assemblies with consequently arranged samples (foils) of metals and alloys under investigation underwent pulse X-radiation. The energy flux of X-radiation was weakened to the needed value by dose filters intensively absorbing soft spectrum of X-radiation.

At carrying out the researches the foils of copper, nickel, titanium, brass, bronze, molybdenum, tungsten, tantalum, cadmium, lead, zinc, silver and steels 0.005-1mm thick were used as objects under investigation. The samples diameter (10-16 mm) was chosen to be quite large as compared to their thickness so that the side load does not affect the central part of the samples and the front (looking the source of X-radiation) and back (shadow) surfaces of the samples are free what makes it possible to consider the processes of spalling fracture in one-dimensional approximation.

Within the frames of kinetic approach to the problem of solid states spalling fracture under pulse loading that considers fracture as progressing in time process there were found spalling fracture time dependencies of lead, cadmium, zinc, silver, copper, brass, bronze, nickel, titanium, molybdenum, tungsten, tantalum and steels under thermal shock initiated by X-radiation. It was demonstrated that longevity of metals and alloys under thermal shock exponentially decreases with the growth of rupture stresses amplitude and can be described in terms of kinetic concept of strength.

Within the frames of energy approach to fracture problem based on comparing energy store in the sample and failure operation there were found time dependencies of critical specific energy of copper, brass, bronze, nickel, titanium, molybdenum, tungsten, tantalum and cadmium failure under the effect of X-radiation. It was demonstrated that critical specific energy of material failure needed to carry out the work of material detachment and separation to parts of the material that underwent thermal shock increases with the growth of tensile stresses duration in the spall cross-section.

The obtained regularities of metals and alloys spalling fracture under thermal shock initiated by X-radiation can be used at design and development of components and assemblies for new pulse power and irradiation installations at elaborating the of methodology experiments on simulating installations as well as at further development of the doctrine in solid states strength under pulse loading.