

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕДИ, НИКЕЛЯ, ТИТАНА, УДК 620.171+539.4.019
ЛАТУНИ И БРОНЗЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОБЛУЧЕНИИ

А. М. Молитвин, И. П. Борин, В. С. Босамыкин

ВНИИ экспериментальной физики, 607200 Саров

Расчетно-экспериментальным путем найдены временные зависимости откольной прочности меди, никеля, титана, латуни и бронзы при тепловом ударе, инициированном кратковременным импульсом рентгеновского излучения ядерного взрыва. Показано, что долговечность меди, никеля, титана, латуни и бронзы в условиях радиационного теплового удара экспоненциально уменьшается с ростом амплитуды разрушающих напряжений (откольной прочности) и может быть описана на основе кинетической концепции прочности.

Одномерные откольные явления интенсивно изучаются главным образом методами соударения пластин и взрыва конденсированного ВВ на поверхности преграды из исследуемого материала (см., например, [1–4]). В последние годы началось интенсивное изучение закономерностей разрушения твердых тел при тепловых ударах, обусловленных быстрым разогревом вещества за счет действия проникающего излучения [5–11].

В идеализированном случае мгновенного и равномерного по массе разогрева в веществе развивается давление $P = \Gamma \rho \varepsilon$ (Γ — коэффициент Грюнайзена, ρ — плотность вещества, ε — концентрация тепловой энергии, введенной на единицу массы). Одномерное растяжение в образце, имеющем поперечные размеры, много большие по сравнению с его толщиной, возникает при взаимодействии двух встречных волн расширения, распространяющихся от свободных поверхностей и встречающихся в средней плоскости образца. В акустическом приближении амплитуда растягивающих напряжений $|\sigma| = P$, а время их действия $t \sim \Delta/c$ (Δ — толщина образца, c — скорость звука). Конечное время разогрева вещества t_0 приводит к уменьшению амплитуды напряжений по сравнению с режимом мгновенного разогрева [11]. При малых значениях безразмерного параметра λ ($\lambda = ct_0/\Delta \ll 1$), характеризующего темп разогрева, это уменьшение амплитуды напряжений незначительно, и его можно не учитывать.

Откольные напряжения, реализующиеся при быстром объемном разогреве вещества, сравнимы с откольными напряжениями, возникающими при обычном ударно-волновом нагружении (подрыв ВВ, соударение пластин). Однако, как отмечалось в работах [4, 8], физические процессы, которые ведут к откольному разрушению в экспериментах с быстрым нагревом, существенным образом отличаются от процессов при ударно-волновом нагружении (рис. 1, где показаны пути деформирования упругопластического материала в координатах напряжение σ — деформация ε , кривая А соответствует режиму мгновенного разогрева, В — методу соударения пластин, линии 1 и 2 — ударная адиабата и изоэнтропа расширения соответственно).

В случае ударно-волнового нагружения материал в будущей области откольного разрушения вначале сжимается, переходя в более плотное по сравнению с исходным состояние, а затем расширяется в волнах разрежения, проходя через исходный удельный объем. В идеализированном случае мгновенного и равномерного разогрева материала в нем гене-

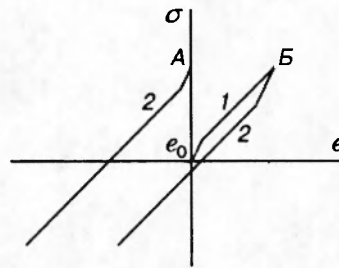


Рис. 1

рируются сжимающие напряжения, хотя материал остается при постоянном объеме. Из этого состояния вещество далее расширяется (при наличии свободных поверхностей) до плотности меньше исходной (рис. 1). Другое различие между рассматриваемыми режимами нагружения состоит в значительно отличающихся температурах материала. Приращение средней температуры при ударном нагружении до десятков гигапаскалей в сплошных металлах мало ($\sim 100 \div 200$ К), в то время как для разрушения в режиме теплового удара, как правило, необходима температура, сравнимая с температурой плавления вещества при нормальных условиях.

Эксперименты по откольному разрушению в режиме быстрого разогрева дают, таким образом, качественно новую информацию, представляющую большой интерес для физики разрушения твердых тел. Практическое значение этих исследований обусловлено тем, что напряжения, возникающие при тепловом ударе, могут привести к откольному разрушению элементов таких современных конструкций, как импульсные реакторы [12, 13], мощные индукционные ускорители [14], взрывомагнитные генераторы [15] и т. п.

Цель настоящей работы — установление закономерностей термомеханического откольного разрушения меди, никеля, титана, бронзы и латуни при радиационном тепловом ударе. В выполненных экспериментах осуществлялся быстрый объемный разогрев кратковременным импульсом рентгеновского излучения ядерного взрыва плоских образцов (фольг) из меди (М1, М1Т, М1М), никеля (НП2, НП2М), титана (ВТ1-0), бронзы (БрБ2, БрБ2М), латуни (Л62, Л63) толщиной от 0,005 до 1 мм в состоянии поставки. Толщина образцов (металлических фольг) была много меньше их диаметра (~ 10 мм), чтобы в центральной зоне образцов не сказывалось влияние боковой разгрузки, а лицевая (обращенная к источнику рентгеновского излучения) и тыльная (теневая) поверхности образцов были свободны, что позволяет рассматривать процессы откольного разрушения в одномерном приближении. С целью наблюдения картины «чистого» откола по условиям экспериментов соответствующим подбором дозирующих фильтров, интенсивно поглощавших мягкую часть спектра рентгеновского излучения, были исключены процессы плавления и испарения вещества. Вариацией толщины испытуемых образцов (металлических фольг) в диапазоне от 0,005 до 1 мм изменялось характерное время разрушения подвергшихся тепловому удару образцов в интервале от $\sim 10^{-9}$ до $\sim 10^{-6}$ с. Термомеханическое разрушение исследовавшихся металлических образцов различной толщины происходило при температуре, близкой к температуре плавления. Градиенты концентрации поглощенной энергии в большинстве подвергшихся тепловому удару металлических фольг были невелики, вследствие чего откол происходил вблизи центральной части фольг.

Представление о степени неравномерности разогрева металлических фольг и крутизне фронта импульса напряжений дает рис. 2, где на момент времени t_0 (окончание импульса

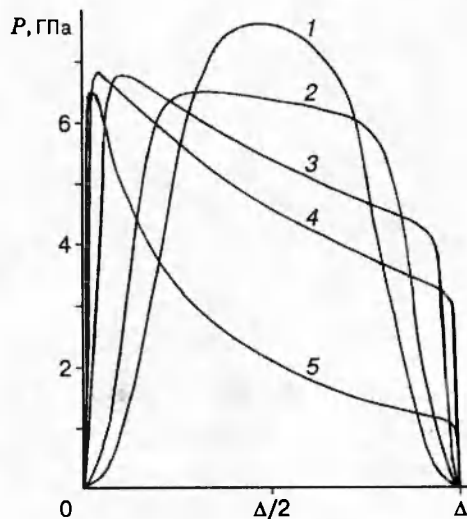


Рис. 2

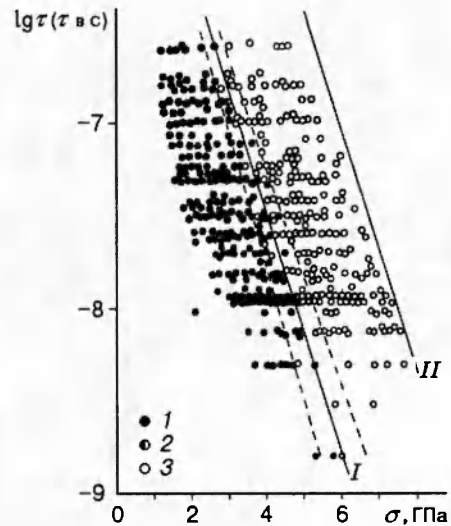


Рис. 3

рентгеновского излучения) показаны типичные распределения напряжений в медных фольгах различной толщины Δ (кривые 1–5 отвечают $\Delta = 0,026; 0,041; 0,134; 0,37; 0,48$ мм).

Для расчетно-методического сопровождения экспериментальных исследований применялись методики и программы ЭЛИЗА [16] и УП-ОК [17]. По первой из них определялись профили энерговыделений, а по второй — характер волновых процессов (с учетом упругопластических свойств материалов) и эволюция напряжений в различных сечениях подвергшихся тепловому удару образцов. При проведении расчетов использовалось двухчленное уравнение состояния вещества в форме Ми — Грюнайзена и учитывалось время нагрева образцов. Каждый подвергшийся тепловому удару образец в зависимости от его толщины разбивался на вполне определенное число частей (от 10 до 200), в каждой из которых рассчитывались амплитуды растягивающих напряжений и времена их действия.

Зная из эксперимента место расположения сечения откола в подвергнутом тепловому удару образце и отождествляя полное время τ действия растягивающих напряжений в сечении откола в первой волне разгрузки поперек образца с долговечностью материала, а амплитуду разрушающих напряжений σ — с откольной прочностью материала, получим после систематизации расчетно-экспериментальных данных временную зависимость откольной прочности материала при тепловом ударе, инициированном кратковременным импульсом рентгеновского излучения ядерного взрыва.

Результаты обработки экспериментальных данных по откольному разрушению меди (М1, М1Т, М1М), никеля (НП2, НП2М), титана (ВТ1-0), бронзы (БрБ2, БрБ2М) и латуни (Л62, Л63) в режиме быстрого объемного разогрева нанесены соответственно на рис. 3–7 в графическом виде в системе координат $\sigma - \lg \tau$. Здесь точки 1 означают отсутствие видимого разрушения, 2 — зарождение откола (начало видимого разрушения), 3 — откол или полное разрушение образца.

Сплошными линиями I на рис. 3–7 показаны наиболее вероятные границы откольного разрушения, отождествляемые нами с динамическими ветвями долговечности соответственно меди, никеля, титана, бронзы, латуни при тепловом ударе. Они отделяют область разрушения при быстром объемном разогреве от области, в которой вещество сохраняет

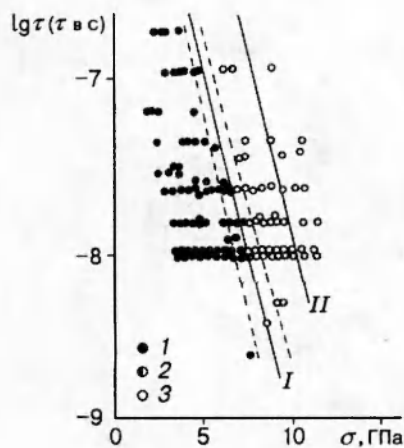


Рис. 4

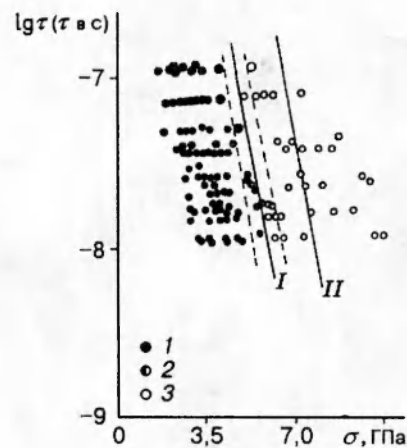


Рис. 5

свою видимую целостность. Погрешность в определении напряжений $10 \div 15\%$ (показана штриховыми линиями), а погрешность в оценке времени их действия не более 10% . В диапазоне времени примерно от 10^{-6} до 10^{-9} с долговечность τ меди, никеля, титана, бронзы, латуни экспоненциально убывает с ростом амплитуды разрушающих напряжений σ , что свидетельствует о справедливости кинетической концепции прочности.

Линиями II на рис. 3–5 показаны динамические ветви долговечности меди, никеля, титана соответственно, полученные С. А. Новиковым и его сотрудниками [18] методом соударения пластин. Расхождение в положении линий I и II обусловлено как уменьшением откольной прочности меди, никеля, титана с ростом температуры, так и отмеченным выше влиянием особенностей процессов деформации меди, никеля, титана при тепловом ударе по сравнению с режимом соударения пластин.

Для описания экспериментальных данных по термомеханическому откольному разрушению при тепловом ударе меди, никеля, титана, бронзы и латуни может быть использована модель кинетики откольного разрушения [18], связывающая амплитуду разрушающих напряжений σ и время их действия τ соотношением

$$\sigma = \frac{1}{\gamma\Omega} \left(U_0 - AkT \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right), \quad (1.1)$$

где Ω — атомный объем; U_0 — энергия сублимации атомов решетки; T — эффективная температура; k — постоянная Больцмана; A , γ , τ_0 — подгоночные параметры. Эффективная температура T в условиях термомеханического разрушения при тепловом ударе близка к температуре плавления.

В более удобном для расчетов виде соотношение (1.1) можно записать как

$$\sigma = \frac{1,6B}{\gamma} \left(U_0 - 1,985 AT \lg \frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

(T , 10^4 К; U_0 , эВ/атом; σ , ГПа; $B = \Omega^{-1}$, 10^{28} м^{-3}).

Расчетно-экспериментальные данные по откольному разрушению меди, никеля, титана, латуни и бронзы при тепловом ударе удовлетворительно описываются при значениях параметров A , γ , τ_0 , приведенных в таблице.

Полученные данные показывают, что на основе усовершенствованной кинетической

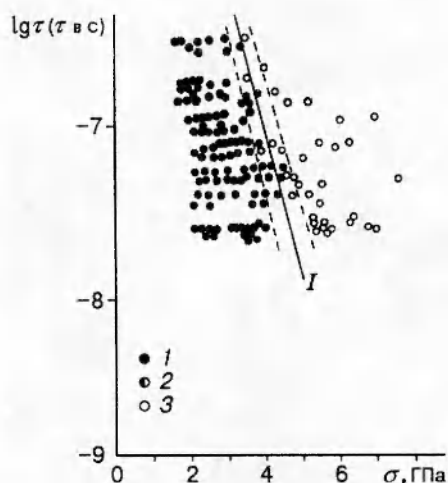


Рис. 6

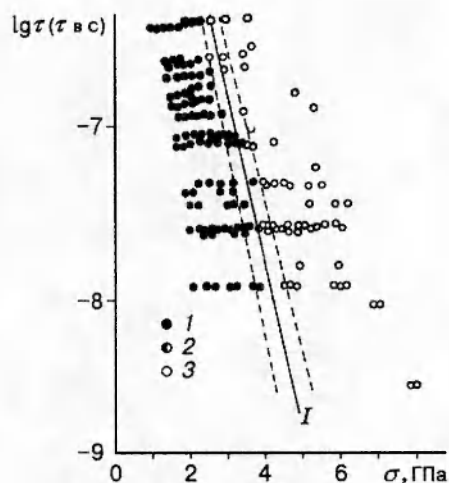


Рис. 7

Материал	$T_{пл}, K$	$U_0,$ эВ/атом	$\Omega^{-1},$ $10^{28} м^{-3}$	$\tau_0 = 10^{-12} с$		$\tau_0 = 10^{-13} с$		A/γ
				A	γ	A	γ	
Медь	1356	3,50	8,45	1,81	4,4	1,59	3,86	0,412
Бронза	1228	3,50	8,45	1,79	4,53	1,59	4,03	0,395
Латунь	1178	3,50	8,45	1,86	5,35	1,66	4,75	0,348
Никель	1726	4,435	9,14	1,77	3,86	1,56	3,4	0,458
Титан	1941	4,855	5,66	1,48	3,88	1,32	3,47	0,381

концепции разрушения твердых тел можно описать долговечность меди, никеля, титана, бронзы и латуни в условиях воздействия теплового удара, инициированного кратковременным импульсом рентгеновского излучения ядерного взрыва. Результаты работы 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. Фадеенко Ю. И. Высокоскоростной удар. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы. Новосибирск, 1967. Вып. 1; 1972. Вып. 2; 1976. Вып. 3; 1979. Вып. 4.
2. Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. 1987. № 5. С. 77–89.
3. Воробьев О. Ю., Демидов Б. А., Ефремов В. П. и др. Применение сильнооточного электронного пучка для генерации плоских ударных волн и метания ударников // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, вып. 22. С. 85–88.
4. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Рузанов А. И., Садырин А. И. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1992.

5. Schmidt R. H., Davies F. M., Lempiere V. M. Temperature dependent spall threshold of four metal alloys // J. Phys. Chem. Solids. 1978. V. 39, N 4. P. 375–385.
6. Carlson G. A. Dynamic tensile strength of mercury // J. Appl. Phys. 1975. V. 46, N 9. P. 4069–4070.
7. **Высокоэнергетическая электроника твердого тела** // Под ред. Д. И. Вайсбурда. Новосибирск: Наука, 1982.
8. **Борин И. П., Лагутин В. И., Бонюшкин Е. К. и др.** Откольное разрушение меди в режиме быстрого объемного разогрева // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1985. Вып. 1. С. 40–42.
9. **Учаев А. Я., Новиков С. А., Цукерман В. А. и др.** Особенности откольного разрушения вольфрама в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310, № 3. С. 611–614.
10. **Павловский А. И., Бонюшкин Е. К., Учаев А. Я. и др.** Особенности температурно-временных закономерностей процесса динамического разрушения некоторых металлов в режиме быстрого объемного разогрева // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317, № 6. С. 1376–1379.
11. **Глушак Б. Л., Новиков С. А., Свиридов В. А., Чернов А. В.** Исследование волн напряжений в стеклотекстолите и фторопласте при их быстром разогреве // ПМТФ. 1980. № 6. С. 99–104.
12. **Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др.** Аперiodические импульсные реакторы // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука, 1984. С. 103–119.
13. **Архангельский Ю. И., Волков В. Г., Муравьев Е. В. и др.** Условия работы конструкционных материалов в импульсном термоядерном реакторе на релятивистских электронных пучках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1979. Вып. 1(3). С. 39–51.
14. **Павловский А. И., Босамыкин В. С.** Линейные индукционные ускорители на радиальных линиях // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука, 1984. С. 132–148.
15. **Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И. и др.** Каскадный магнитокумулятивный генератор сверхсильных магнитных полей // Тр. 3-й Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. М.: Наука, 1984. С. 19–22.
16. **Донской Е. Н.** Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса γ -излучения, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.
17. **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 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3(11). С. 11–14.
18. **Борин И. П., Новиков С. А., Погорелов А. П., Сеницын В. А.** О кинетике разрушения металлов в субмикросекундном диапазоне долговечности // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266, № 6. С. 1377–1380.

*Поступила в редакцию 9/III 1995 г.,
в окончательном варианте — 31/VII 1995 г.*