

О ХАРАКТЕРЕ РАЗРУШЕНИЯ КАДМИЕВОЙ ФОЛЬГИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ

УДК 539.4:623.454.8

В. К. Голубев, К. Г. Рабинович, А. К. Чернышев,
Н. А. Юкина

ВНИИ экспериментальной физики, 607200 Саров

В данной работе представлены результаты исследования характера разрушения кадмиевых образцов в условиях рентгеновского облучения, реализуемых при ядерном взрыве. Определены критические нагрузки, соответствующие макроскопическому откольному разрушению, зарождению откольных микроповреждений и уносу материала с лицевой поверхности.

Кадмиевые покрытия находят применение в разнообразных конструкциях атомной техники, что обусловлено возможностью их комплексного функционирования, с одной стороны, как антикоррозийных, с другой — как защитных от воздействия проникающих излучений. В связи с этим практический и научный интерес представляет изучение предельной стойкости тонких слоев кадмия в достаточно жестких условиях радиационного воздействия. Цель данной работы — выяснение такого вопроса для условий интенсивного рентгеновского облучения, реализуемых при ядерном взрыве.

Испытуемые образцы в виде дисков диаметром 20 мм вырезались из листа кадмиевой фольги толщиной 0,30 мм. Образец устанавливался в специальный корпус таким образом, что его тыльная поверхность подпиралась слоем низкоплотного пенополистирола, а лицевая, обращенная в сторону ядерного взрыва, экранировалась кадмиевым фильтром. Для контроля стабильности результатов два идентичных корпуса с образцами устанавливались на одинаковом расстоянии от источника излучения. После облучения проводился визуальный осмотр корпусов с образцами, которые оказались в достаточной степени сохраненными. Структура и характер разрушения этих образцов исследовались методом металлографического анализа.

На рис. 1 показаны фрагменты продольного диаметрального сечения одного из образцов при увеличении $\times 100$ (а) и $\times 500$ (б). В первом случае наблюдаются формирование и раскрытие в образце макроскопической откольной трещины, а во втором более отчетливо просматриваются структура кадмиевого образца и характер его микроскопического откольного повреждения. Такая же картина имеет место и для другого образца. В частности, выполненные измерения показали, что унос материала с лицевой поверхности образцов произошел на глубину около 0,02 мм. Толщина откольного слоя составила около 0,05 мм, тогда как откольные микроповреждения в виде пор появляются в образцах на глубине около 0,10 мм.

На рис. 2 приведен полученный в результате численного расчета профиль поглощенной энергии E по толщине образца. Длительность рентгеновского импульса была существенно меньше времени пробега акустической волны по толщине образца, что позволило не принимать ее во внимание при первоначальном рассмотрении реализующихся при нагружении физико-механических явлений. Необходимые характеристики кадмия взяты в основном из [1]. Начальная температура образца составляла около 20 °С. Для перехода от профиля поглощенной энергии к профилю температуры разогрева ΔT использовалось среднее для температурного диапазона 20 ÷ 320 °С значение теплоемкости 248 Дж/(кг·К). В этом случае разогрев $\Delta T = 300$ К, соответствующий началу перехода от кристалличе-



Рис. 1

ского к расплавленному состоянию, реализовывался при $E = 75$ кДж/кг, т. е. на глубине $x = 0,06$ мм. Условия полного плавления, требующие $E = 132$ кДж/кг, не достигались на лицевой поверхности образца, поэтому поверхностный слой толщиной 0,06 мм, разогретый до 300 К, оставался в твердом, хотя и неустойчивом состоянии. Таким образом, температуры на характерных фиксируемых глубинах, отвечающих уносу материала с лицевой поверхности ($x = 0,02$ мм), зарождению откольных микрповреждений ($x = 0,10$ мм) и полному макроскопическому откольному разрушению ($x = 0,25$ мм), составили соответственно 321 °С (температура плавления), 228 и 141 °С.

На основании полученных результатов по разогреву образца могут быть сделаны оценки отрицательного растягивающего давления на глубинах, отвечающих зарождению микрповреждений и макроскопическому откольному разрушению, а также более грубая ориентировочная оценка отрицательного давления на глубине, соответствующей уносу материала с лицевой поверхности. Для этого, несколько упростив ситуацию, представим профиль температуры разогрева по толщине образца в виде экспоненциальной функции $\Delta T = 300 e^{-3,64x}$, взяв в качестве опорных точки на лицевой поверхности и на глубине макроскопического откольного разрушения.

Достаточно просто может быть получено решение акустической задачи о волновом процессе в разогретом образце, частные случаи которого для необходимых глубин x приведены на рис. 3. При решении задачи для плотности и объемной скорости звука использовались значения 8,64 г/см³ и 2,42 км/с, для температурного коэффициента линейного расширения — среднее значение $31 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ для диапазона 20 ÷ 320 °С. Показанные на рис. 3 зависимости давления P от времени соответствуют глубинам $x = 0,25; 0,10; 0,02$ мм (линии 1–3). Анализируя эти зависимости, отметим, что нагружение растягивающим импульсом с отрицательным давлением 1,20 ГПа и длительностью 0,02 мкс при температуре 140 °С приводит к полному макроскопическому откольному разрушению кадмия, а нагружение импульсом такой же длительности с отрицательным давлением 0,65 ГПа при температуре 230 °С — к начальной стадии зарождения откольных микрповреждений. Можно также предположить, что откольное разрушение кадмия, нагретого до температу-

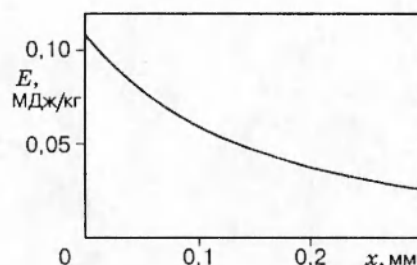


Рис. 2

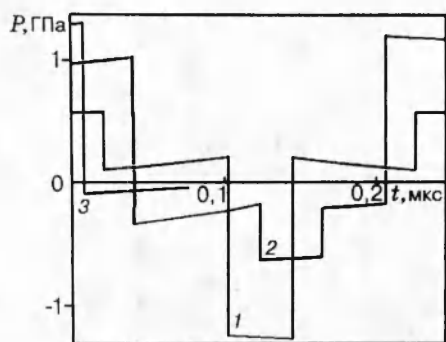


Рис. 3

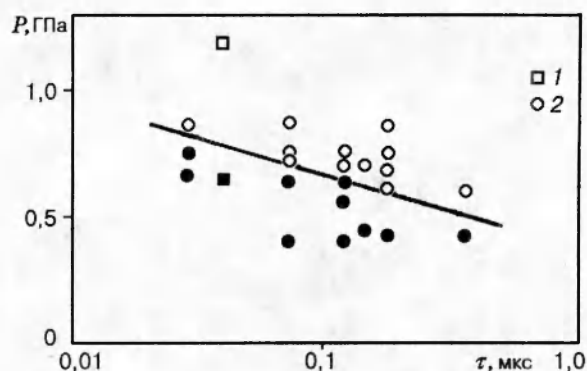


Рис. 4

ры плавления, характеризуется отрицательным давлением около 0,1 ГПа, действующим в период времени порядка $0,01 \div 0,02$ мкс.

Сопоставим наши результаты по разрушению кадмия в условиях рентгеновского облучения с полученными в [2] при облучении сильноточным электронным пучком. В [2] облучались образцы кадмия различной толщины, что позволило выявить влияние длительности растягивающего импульса τ на критическое отрицательное давление, соответствующее начальной стадии макроскопического откольного разрушения.

На рис. 4 приведены результаты данной работы и [2] (точки 1 и 2 соответственно). Темные точки указывают на сохранение макроскопической целостности образца, светлые — на формирование в образце визуально наблюдаемой макроскопической откольной трещины. В [2], кроме того, проводился анализ откольных поверхностей с использованием компьютерной системы обработки изображений. Средний размер шероховатостей, покрывающих поверхность, для образцов толщиной $0,18 \div 0,30$ мм находился в пределах $0,02 \div 0,03$ мм, что также достаточно хорошо согласуется с результатами выполненного в данной работе качественного анализа изображений диаметрального продольного сечения. Результаты экспериментов по откольному разрушению материала, нагретого до температуры плавления, приведены в [3]. При взрывном нагружении оловянных образцов ударными волнами различной интенсивности в диапазоне давлений $16 \div 22$ ГПа была отмечена тенденция снижения откольной прочности олова от 0,7 до 0,05 ГПа. Подобное снижение, по-видимому, объясняется тем, что в указанном диапазоне давлений разгруженному материалу сообщалась энергия, необходимая для перехода от кристаллического к расплавленному состоянию, и его температура соответствовала температуре плавления. В этом случае результат ориентировочной оценки условий уноса поверхностного слоя кадмия с разогретой до температуры плавления лицевой поверхности может быть признан вполне приемлемым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
2. Бонюшкин Е. К., Жуков И. В., Завада Н. И. и др. Особенности откольного разрушения конструкционных материалов в режиме быстрого объемного разогрева и при взрывном нагружении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1988. Вып. 1. С. 53–61.
3. Grady D. E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids. 1988. V. 36, N 3. P. 353–384.

Поступила в редакцию 30/X 1995 г.