

ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ПЛУТОНИЯ И ЕГО СПЛАВА С ГАЛЛИЕМ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. К. Голубев, Ю. С. Соболев, И. Р. Трунин

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты расчетного анализа условий откольного разрушения плутония и его сплава с массовой долей 1,6 % галлия при ударном нагружении. На основании полученных ранее экспериментальных данных определены критические растягивающие напряжения, соответствующие начальной стадии макроскопического откольного разрушения образцов. В расчетах учтены упругопластические свойства материалов и полиморфные превращения в сплаве при нормальной и повышенной (315 °С) температурах.

Вопросы, связанные с изучением прочности и разрушения таких важных материалов атомной техники, как плутоний и его δ -стабилизированный сплав с галлием, представляют определенный научный и практический интерес. В условиях одноосного растяжения испытываемых образцов выявлены тенденции влияния некоторых факторов на механические свойства этих материалов. Так, в работе [1] исследовано влияние на механические свойства скорости деформации в широких пределах ее изменения, в [2, 3] наряду с влиянием скорости деформации исследовано также влияние исходной температуры. Что касается условий более интенсивного и кратковременного ударного нагружения, то можно отметить лишь работу [4], в которой приведены результаты исследования откольного разрушения плутония и его δ -стабилизированного сплава с массовой долей 1,6 % галлия при нагружении образцов через защитный экран ударом быстролетящей пластины. В проведенной серии опытов определены скорости удара, соответствующие начальной и последующим стадиям макроскопического откольного разрушения образцов, отмечено различие в характере откольного разрушения хрупкого плутония и его достаточно пластичного сплава. В данной работе, являющейся продолжением начатого в [4] исследования, приведены результаты металлографического анализа испытанных образцов и расчетного анализа условий откольного разрушения указанных материалов.

Кратко остановимся на постановке и результатах опытов, приведенных в работе [4]. Испытываемые образцы представляли собой диски толщиной 4 мм с большим диаметром 40 мм и боковой поверхностью, скошенной для удобства крепления под углом 45°. Они крепились к медному экрану толщиной 12 мм, служащему крышкой герметичного контейнера. Нагружение производилось ударом по экрану алюминиевой пластины толщиной 4 мм, разгоняемой до необходимой скорости w демпфируемым взрывом слоя пластического взрывчатого вещества. Образцы сплава испытывались при нормальной и повышенной температуре. Нагрев до температуры 315 °С осуществлялся вместе с контейнером при помощи электронагревательного устройства. Образцы, сохранившие макроскопическую целостность, разрезались, и степень их откольного разрушения наблюдалась на полированных шлифах диаметральных продольных сечений. Результаты опытов представлены в табл. 1. Для двух случаев полного откольного разрушения указаны толщины h_s образующихся откольных слоев.

С целью выявления структуры исследуемых материалов и определения характера их

Таблица 1

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$w, \text{м/с}$	Степень откольного разрушения
Плутоний	40	259	Откол
		134	Откол, $h_s = 1,9 \text{ мм}$
		134	Магистральная откольная трещина
		113	Сохранение целостности
Сплав плутония с галлием	40	499	Откол
		385	Откол, $h_s = 1,2 \text{ мм}$
		262	Магистральная откольная трещина
		257	Начало образования магистральной откольной трещины
	315	226	Широко раскрытая магистральная откольная трещина
		208	Небольшая откольная трещина
193		Сохранение целостности	

откольного разрушения проведен металлографический анализ испытанных образцов. Шлифы их продольных сечений подвергали электролитическому травлению в 50 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте и наблюдали с помощью металлографического микроскопа. Характерная структура материалов с зарождающимися откольными микроповреждениями показана на рис. 1 при 300-кратном увеличении. Структура исследуемого плутония характеризуется неоднородными зернами α -фазы, зарождение хрупкого откольного разрушения происходит в нем путем образования микротрещин скола, а последующее растрескивание — также и по границам зерен. Структура сплава с галлием характеризуется равноосными зернами δ -фазы с размерами 30–40 мкм. Зарождение откольного разрушения происходит в сплаве в виде микропор на присутствующих в структуре включениях и отчасти по границам зерен. Последующее развитие разрушения обусловлено вязким ростом и слиянием пор.

Анализ условий нагружения и откольного разрушения образцов исследуемых материалов проводился с использованием программы расчета одномерных упругопластических течений. В соответствии с классической схемой решалась система уравнений

$$\frac{\partial V}{\partial t} - V_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} - V_0 \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial t} = (-P + S) \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (1)$$

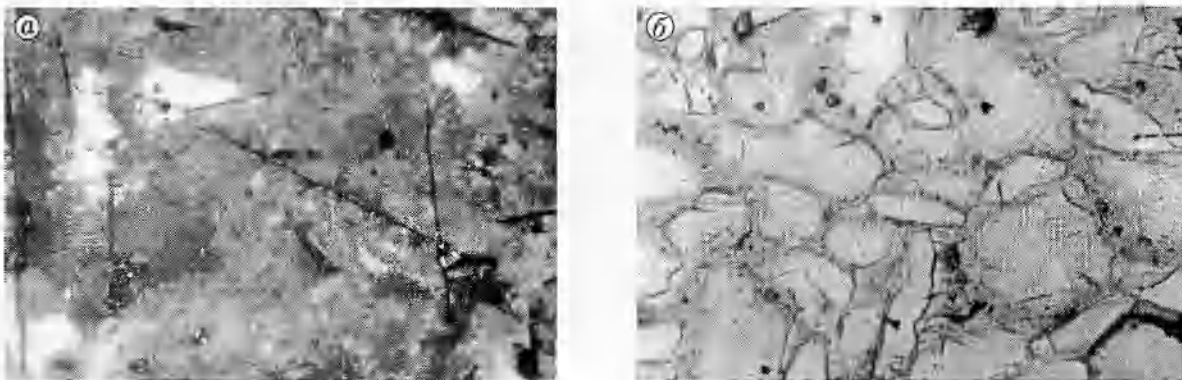


Рис. 1. Структура материалов с зарождающимися откольными микроповреждениями: а — плутоний, б — сплав плутония с галлием

описывающих в адиабатическом приближении процесс одномерного движения прочной сжимаемой среды в лагранжевых координатах в направлении оси x . Здесь V , u , σ , P и S — соответственно удельный объем, скорость, продольное напряжение и его шаровая и девиаторная составляющие. Шаровую составляющую тензора напряжений задавали в виде

$$P(\delta) = \frac{\rho_0 c_0^2 \delta (\delta - 1)}{[\delta - \lambda(\delta - 1)]^2}, \quad (2)$$

где $\delta = \rho/\rho_0 = V_0/V$. Формула (2) фактически является трансформированной (с использованием уравнений непрерывности и сохранения импульса на ударном разрыве) ударной адиабатой типа линейного соотношения между массовой и волновой скоростями $D = c_0 + \lambda u$. Ее применение вполне допустимо вследствие фактического совпадения ударной адиабаты с кривой изотермического сжатия в рассматриваемой области низких давлений. Девиаторную составляющую тензора напряжений определяли в соответствии с законом Гука

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{4}{3} \frac{G}{V} \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (3)$$

где G — модуль сдвига. В случае превышения абсолютным значением S величины $(2/3)Y$, где $Y = (1 - 2\nu)/(1 - \nu)\sigma_e$ — динамический предел текучести в условиях одноосного растяжения — сжатия, проводилась корректировка девиатора по формуле $S = (2/3)Y \operatorname{sgn}(S)$. Решение системы уравнений (1)–(3) с начальными и граничными условиями проводилось методом конечных разностей.

В расчетах учитывались упругопластические свойства материалов ударника, экрана и образца, а в случае рассмотрения результатов для сплава с галлием — также происходящие при нормальной и повышенной температурах полиморфные δ - α - и δ - β -превращения. Используемые в расчетах характеристики материалов, такие как плотность ρ_0 , объемная скорость звука c_0 , коэффициент Пуассона ν и упругий предел Гюгонио σ_e , приведены в табл. 2. Эти данные взяты из работ [5–7]. Для коэффициента λ принято значение 1,5 для всех материалов, кроме алюминия, для которого $\lambda = 1,4$. Для σ_e δ -фазы при температуре 315 °С принято значение 0,3 ГПа. В соответствии с данными [8] для давлений обратимых полиморфных превращений взяты значения 0,7 ГПа (δ - α -превращение) и 0,4 ГПа (δ - β -превращение). Расчетный анализ проводили с рядом неизбежных, связанных с ограниченностью имеющихся экспериментальных данных упрощающих предположений. Материал образцов считался неповреждаемым в зоне растяжения, т. е. не учитывалось соответствующее накоплению повреждений явление релаксации растягивающих напряжений. Обратимые полиморфные превращения в сплаве с галлием считались безынерционными, т. е. не

Таблица 2

Материал	Состояние	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	ν	σ_e , ГПа
Плутоний	α -фаза	19,6	1,65	0,17	1,4
Сплав плутония с галлием	δ -фаза	15,7	1,37	0,27	0,6
	α -фаза	18,9	1,65	0,17	1,2
	β -фаза	17,1	1,37	0,27	0,3
Алюминий	—	2,7	5,25	0,34	0,2
Медь	—	8,9	3,95	0,35	0,4

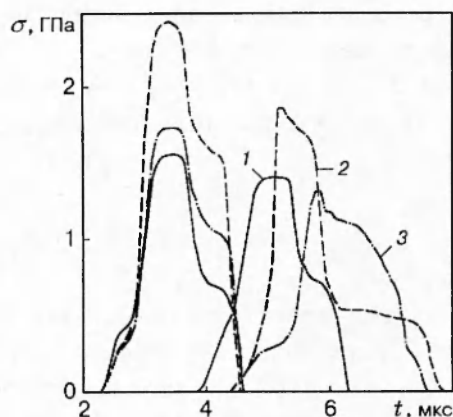


Рис. 2. Изменение импульса продольного напряжения при прохождении его через образец:

кривые 1–3 — опыты 1–3 соответственно

учитывались кинетические закономерности их реального протекания. Процесс полиморфного превращения в расчетной схеме учитывался путем изменения параметров уравнения (2) при выходе на граничное для данной фазы значение P либо соответствующее ему значение δ .

В практическом плане наибольший интерес вызывает определение критерия макроскопического откольного разрушения плутония и его сплава с галлием при ударном нагружении. В качестве такого критерия можно принять экспериментально определенные скорости удара 134 м/с для плутония, 257 м/с для сплава при нормальной температуре и 208 м/с при повышенной температуре (опыты 1–3 соответственно). На рис. 2 показано изменение импульса продольного напряжения для указанных выше случаев. Отсчет времени ведется от момента контакта ударника с экраном. Слева на рис. 2 даны импульсы, входящие в образцы из экрана, справа — трансформированные при прохождении расстояния, равного толщине образцов, т. е. 4 мм. Различия в характере изменения импульсов обусловлены прежде всего различиями в значениях σ_e для разных фазовых состояний плутония.

На рис. 3 приведены графики растягивающих напряжений для образцов плутония и его сплава с галлием при нормальной и повышенной температурах. Результаты этих расчетов позволяют определить предположительные толщины образующихся в образцах откольных слоев и максимальные растягивающие напряжения, реализующиеся на этих толщинах.

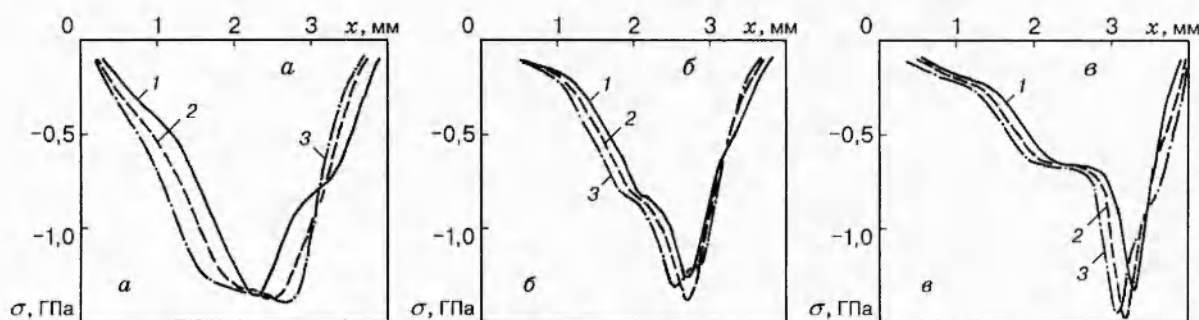


Рис. 3. Растягивающие напряжения в образцах:

а–в — опыты 1–3; кривые 1–3 соответствуют следующим временам, отсчитываемым от момента контакта ударника с экраном: 5,6; 5,7 и 5,8 мкс (а); 6,7; 6,8 и 6,9 мкс (б); 6,9; 7,0 и 7,1 мкс (в)

Для плутония расчетное значение толщины образующегося откольного слоя составило 1,8 мм, а максимальное значение растягивающего напряжения — 1,4 ГПа (рис. 3,а). Для сплава при нормальной температуре (рис. 3,б) эти значения составили соответственно 1,3 мм и 1,4 ГПа, а при повышенной температуре (рис. 3,в) — 0,9 мм и 1,5 ГПа.

Аналогичные расчеты проводились для всех приведенных в табл. 1 опытов. Так, при нагружении образцов плутония со скоростями удара 113 и 259 м/с максимальные растягивающие напряжения составляли 1,3 и 1,8 ГПа, а при нагружении образца сплава со скоростью 385 м/с — 2,0 ГПа. Кроме того, в расчетах варьировались значения упругого предела Гюгонио в диапазонах 0,1–0,3 ГПа для алюминия, 0,2–0,5 ГПа для меди и 1,4–1,8 ГПа для плутония, а также значения давления полиморфного δ - α -превращения для сплава с галлием в диапазоне 0,7–1,2 ГПа. Отмечено, что варьирование этих характеристик не сказывается существенно на значениях критических растягивающих напряжений для рассмотренных материалов и условий нагружения. Во всех трех случаях эти значения оставались примерно одинаковыми и близкими к 1,4 ГПа.

Полученные расчетные значения толщин образующихся в образцах откольных слоев достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Этот факт является определенным подтверждением правомерности используемого метода упрощенного расчетного анализа экспериментальных результатов. Следует отметить, что полученные для плутония и его сплава с галлием результаты по критическим разрушающим нагрузкам не проявляют явной корреляции с результатами по прочности этих материалов в условиях одноосного растяжения. Так, в соответствии с результатами работы [1] при изменении скорости деформации от 10^{-5} до 10^2 с $^{-1}$ прочность плутония увеличивается от 0,40 до 0,65 ГПа, а прочность сплава с массовой долей 1% галлия — от 0,11 до 0,15 ГПа. В соответствии с результатами работы [3] при скорости деформации 10^{-4} с $^{-1}$ нагрев сплава с массовой долей 1,3% галлия от нормальной температуры до 300 °С приводит к четырехкратному снижению его прочности. Используемый в работе [4] метод ударного нагружения реализует в образцах условия одномерной деформации при существенно больших по сравнению с упоминаемыми скоростях деформации. Результатом его применения к исследуемым материалам явился отмеченный факт нивелирования отчетливо наблюдаемых в условиях одноосного растяжения эффектов влияния на прочность как фактора δ -стабилизации путем легирования галлием, так и фактора нагрева до температуры 315 °С. Подобные тенденции, в большей или меньшей степени проявляющиеся при исследовании других металлов и сплавов при ударном нагружении, в настоящее время еще не получили однозначного и общепринятого объяснения, что в значительной степени обусловлено недостаточной точностью и информативностью экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hecker S. S., Morgan J. R. Effect of strain rate on the tensile properties of α - and δ -stabilized plutonium // Plutonium 1975 and Other Actinides. Amsterdam: North-Holland Publ. Company, 1976. P. 697–708.
2. Merz M. D. Strength differential effect in α -Pu // Metallurgical Trans. 1973. V. 4, N 4. P. 1186–1188.
3. Beitscher S. The tensile behavior of Pu/1 wt% Ga at -60 , 30 and 77 °C // J. Nucl. Matr. 1967. V. 24, N 1. P. 113–117.
4. Батьков Ю. В., Голубев В. К., Новиков С. А. и др. О разрушении плутония и его сплава с массовым содержанием галлия 1,6% при ударном нагружении // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 1. С. 40–42.

5. **Merz M. D., Hammer J. H., Kjarmo H. E.** Sound velocity and elastic moduli in α -plutonium at pressures to 50 kbar // Plutonium 1975 and Other Actinides. Amsterdam: North-Holland Publ. Company, 1976. P. 567-571.
6. **Moment R. L.** Single-crystal elastic constants of a plutonium-gallium alloy // Ibid. P. 687-695.
7. **Calder C. A., Draney E. C., Wilcox W. W.** Noncontact measurements of the elastic constants of plutonium at elevated temperatures // J. Nucl. Matr. 1981. V. 97, N 1, 2. P. 126-136.
8. **Roux C., Roux P., Rapin M.** Influence de la pression sur le diagramme de phases Pu-Ga // J. Nucl. Matr. 1971. V. 40, N 3. P. 305-310.

Поступила в редакцию 18/XI 1996 г.
