

О РАЗРУШЕНИИ БЕРИЛЛИЯ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

УДК 539.4

Ю. В. Батьков, В. К. Голубев, Ю. С. Соболев,
И. Р. Трунин, Н. Д. Фишман

ВНИИ экспериментальной физики, 607200 Саров

Определение откольной прочности бериллия, являющегося одним из важных материалов современной техники, проводилось в ряде работ при ударном нагружении образцов. Например, в [1] с помощью метода металлографического анализа испытанных образцов находилась временная зависимость откольной прочности бериллия при нормальной и повышенной (260 °С) температуре. В [2, 3] исследовалась откольная прочность бериллия с помощью интерферометрического метода регистрации скорости свободной поверхности образцов в процессе нагружения. Полученные в указанных работах значения откольной прочности характеризуют условия зарождения в образцах откольных повреждений. Цель данной работы — определить критические ударные нагрузки, приводящие к макроскопическому откольному разрушению бериллиевых образцов при нормальной и повышенной (400 °С) температуре.

Образцы бериллия представляли собой диски диаметром 90 мм и толщиной 20 мм. Они нарезались от трех заготовок, условно обозначаемых буквами *А*, *Б* и *В*. Заготовки изготавливались из порошка технического бериллия с размерами частиц до 56 мкм (*А* и *Б* — методом горячего прессования в вакууме, *В* — методом выдавливания спеченного порошка); значения предела прочности материала заготовок *А*, *Б* и *В* в статических условиях одноосного растяжения составляли 0,39; 0,36 и 0,58 ГПа соответственно. Ударное нагружение образцов осуществлялось ударом алюминиевой пластины с поперечными размерами 110 × 150 мм и толщиной 4 мм. Пластина разгонялась до необходимой скорости w с помощью скользящей детонации слоя пластического ВВ. Нагрев образцов до температуры 400 °С производился электронагревателем. Общая постановка таких опытов описана в [4]. Для предотвращения разрушения образцов от изгибающих нагрузок, обусловленных торможением на них ударников больших размеров, использовались охранные кольца из стали.

Опыты проводились по двум схемам. В первом случае непосредственно нагружался свободный образец без регистрации условий нагружения, во втором образец располагался между алюминиевым экраном толщиной 2 мм и плексигласовым подслоем толщиной 10 мм, а на границах раздела устанавливались манганиновые датчики давления. Проводился численный расчет условий нагружения образцов во всех выполненных опытах. Использовалась одномерная программа расчета упругопластических течений, подобная описанной в [5].

Необходимые для проведения расчета свойства материалов приведены в табл. 1, где ρ — плотность, c_0 и λ — коэффициенты линейного соотношения $D = c_0 + \lambda u$ между массовой и волновой скоростями, c_l и c_t — продольная и поперечная скорости звука, σ_e — упругий предел Гюгонио.

Условия нагружения образцов представлены в табл. 2. Здесь указаны полученные экс-

Таблица 1

Материал	ρ , г/см ³	c_0 , км/с	λ	c_l	c_t	σ_e , ГПа
				км/с		
Алюминий	2,70	5,25	1,39	6,39	3,15	0,2
Бериллий	1,84	8,09	1,73	12,8	8,80	0,2
Плексиглас	1,18	2,59	1,51	—	—	—

Таблица 2

Номер образца	T , °C	Материал	w , м/с	Эксперимент		Расчет		
				σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_3
				ГПа				
1	~ 0	А	257	—	—	1,99	—	1,60
2			180	—	—	1,40	—	1,05
3			206	—	0,49	1,59	0,46	0,79
4			129	1,11	0,30	1,01	0,28	0,43
5		Б	257	—	—	1,99	—	1,60
6			180	—	—	1,40	—	1,05
7			129	0,97	0,27	1,01	0,28	0,43
8		В	257	—	—	1,99	—	1,60
9			180	—	—	1,40	—	1,05
10			234	—	0,64	1,80	0,56	0,88
11			129	1,05	—	1,01	0,28	0,43
12	400	Б	385	—	—	2,98	—	2,48
13			331	—	—	2,56	—	2,11
14			257	—	—	1,99	—	1,60

периментально и расчетно значения напряжения в импульсах, входящих в образец σ_1 и в плексигласовый подслои σ_2 , а также расчетные значения напряжения в отраженных в образец растягивающих импульсах σ_3 .

Полученные в одном из проведенных опытов (материал В, $w = 129$ м/с) осциллограммы сигналов манганиновых датчиков, расположенных на границах раздела экран — образец и образец — подслой, показаны на рис. 1. Калибровки давления для верхнего и нижнего луча соответственно 0,63 и 0,30 ГПа. Частота меток временной синусоиды 1 МГц. На нижней осциллограмме фиксируется следующий за основным импульсом откольный импульс, обусловленный образованием в образце откольного разрушения. Подобные откольные импульсы были зафиксированы и в других опытах.

Часть из полученных в одном из проведенных расчетов ($w = 129$ м/с) результатов показана на рис. 2, где линии 1, 2 — изменение напряжения на толщине откольного слоя 6,4 мм и на границе образец — подслой при условии сохранения целостности материала, 3–5 — изменение напряжения на границе образец — подслой в случае разрушения при достижении растягивающим напряжением значения 0,4 ГПа либо в моменты времени 3,9 и 4,2 мкс.

После опытов проводился визуальный осмотр образцов. Приведем результаты этого осмотра. Образцы 1, 5, 8, 12 (см. табл. 2) разрушились на значительное число фрагментов. Результаты рассмотрения фрагментов показали, что образцы перед фрагментацией претерпевали макроскопическое откольное разрушение, поскольку фрагменты откольного слоя и оставшейся части наблюдались раздельно.

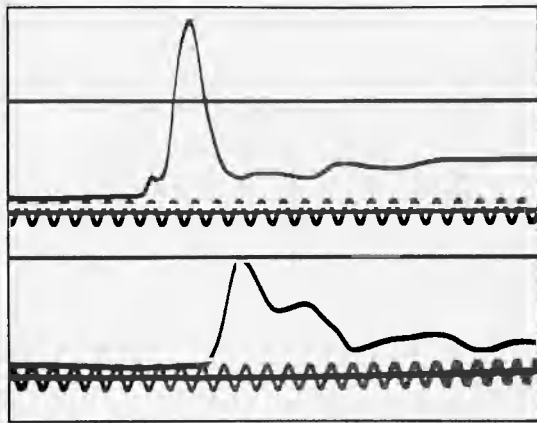


Рис. 1

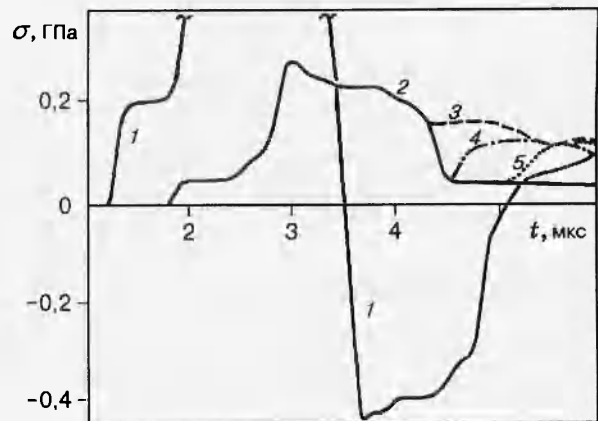


Рис. 2

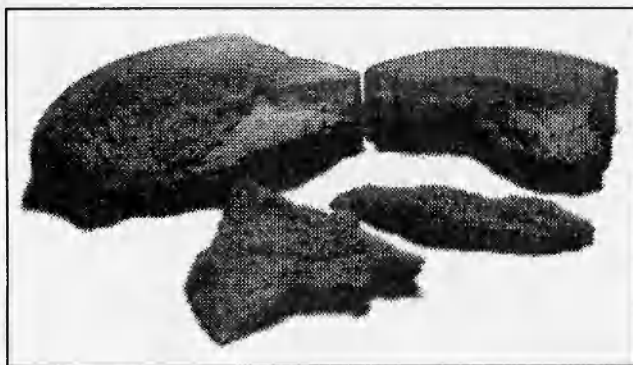


Рис. 3

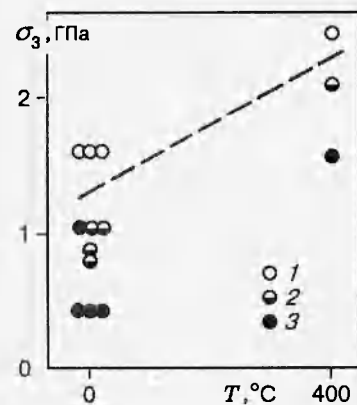


Рис. 4

Часть фрагментов одного из разрушившихся таким образом образцов (материал А, $w = 257$ м/с) показана на рис. 3. Образцы 3, 6, 9, 10, 13 разрушились на несколько продольных фрагментов. При визуальном осмотре поверхностей бокового излома фрагментов на них были видны небольшие трещины в зоне предполагаемого откола. На образцах 2, 4 наблюдались продольные трещины. Образцы 7, 11, 14 сохранили макроскопическую целостность.

Полученные результаты по определению условий макроскопического откольного разрушения бериллиевых образцов показаны для наглядности на рис. 4, где состояние испытанных образцов условно подразделяется на следующие градации: 1 — полное макроскопическое откольное разрушение, 2 — разрушение образца на продольные фрагменты, появление на боковых поверхностях фрагментов небольших трещин в зоне предполагаемого откола, 3 — сохранение образцом макроскопической целостности либо наличие на нем продольных трещин, не приводящих к разрушению на фрагменты.

Таким образом, при характерном времени нагружения 1,5 мкс условия макроскопического откольного разрушения бериллия могут быть охарактеризованы значением расчетного растягивающего напряжения $(1,3 \pm 0,2)$ ГПа при нормальной температуре и $(2,3 \pm 0,2)$ ГПа при нагреве до 400 °С. Относительно откольной прочности, характеризующей условия зарождения повреждений, отметим следующее. Сопоставление получен-

ных экспериментальных результатов по образованию откольных импульсов при скорости удара 129 м/с (см. рис. 1) и результатов соответствующего расчета реализующегося в таких условиях растягивающего напряжения (см. рис. 2) позволяет предположить, что при нормальной температуре испытаний и рассматриваемых временных условиях нагружения откольная прочность бериллия составляет около 0,4 ГПа.

Указанное значение откольной прочности достаточно хорошо согласуется с результатами, полученными ранее. Наиболее низкие значения откольной прочности ($0,25 \div 0,33$ ГПа) найдены для высокочистого крупнозернистого бериллия в диапазоне характерных времен нагружения $0,3 \div 1,0$ мкс в [1]. Нагрев до 260°C приводил здесь к увеличению откольной прочности до значений $0,31 \div 0,50$ ГПа. В [2] испытывались образцы из горячепрессованного и текстурированного бериллия. Откольная прочность оценивалась на основании результатов регистрации скорости свободной поверхности образцов в процессе нагружения. При характерном времени нагружения 0,4 мкс как для исходного, так и для текстурированного состояния материала было получено значение откольной прочности 0,6 ГПа. В [3] таким же методом для горячепрессованного бериллия при нагреве до 230°C найдено значение откольной прочности 0,8 ГПа при характерном времени нагружения 0,8 мкс. На основании этих результатов можно отметить, что нагрев до $230 \div 260^\circ\text{C}$ увеличивает откольную прочность бериллия на $25 \div 50\%$.

В данной работе нагрев до 400°C приводит к увеличению расчетного растягивающего напряжения, соответствующего макроскопическому откольному разрушению, на 75%, что хорошо согласуется с выявленной ранее тенденцией. Повышение динамических прочностных свойств чрезвычайно хрупкого при нормальной температуре бериллия при его нагреве, несомненно, связано с увеличением его пластичности. В [6] отмечено, что для бериллия растягивающее напряжение, соответствующее макроскопическому откольному разрушению, более чем втрое превосходит откольную прочность, отвечающую зарождению откольных повреждений, что также подтверждается результатами данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кристмен Д. Р., Фраула Н. Х. Динамические свойства бериллия высокой чистоты // Ракетная техника и космонавтика. 1970. Т. 8, № 3. С. 119–125.
2. Stevens A. L., Pope L. E. Wave propagation and spallation in textured beryllium // Metallurgical Effects at High Strain Rates. N. Y.: Plenum Press, 1973. P. 459–472.
3. Bjorkman M. D., Shrader J. E. Shock wave propagation in beryllium at small impact stresses and elevated temperatures // Shock Waves in Condensed Matter — 1981. N. Y.: AIP, 1982. P. 432–436.
4. Голубев В. К., Новиков С. А., Сеницын В. А., Соболев Ю. С. Влияние температуры на критические условия откольного разрушения металлов // ПМТФ. 1980. № 4. С. 136–140.
5. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
6. Steinberg D. J., Sharp R. W. Interpretation of shock-wave data for beryllium and uranium with an elastic-viscoplastic constitutive model // J. Appl. Phys. 1981. V. 52, N 8. P. 5072–5083.

Поступила в редакцию 25/V 1995 г.