

8. А. Н. Дремни, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.
9. G. Waacklerle, G. Johnson, P. Halleck. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
10. Г. И. Канель, А. Н. Дремни. ФГВ, 1977, 13, 1.
11. Ю. В. Батьков, С. А. Новиков, А. П. Погорелов и др. ФГВ, 1979, 15, 5.
12. Y. de Longueville, C. Fauquignon, H. Moulard. Sixth Symp. (Internat.) on Detonation. California, 1976.
13. М. Я. Васильев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
14. Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. П. Погорелов и др. ФГВ, 1981, 17, 6.
15. В. С. Соловьев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
16. V. M. Titov, V. F. Lobanov, S. A. Bordzilovski a. o. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
17. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак, С. А. Новиков и др. ФГВ, 1977, 13, 2.
18. E. F. Gittings. Fourth Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1965.
19. B. D. Trott, R. G. Jung. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Pasadena, 1970.
20. A. S. Schwarz. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
21. R. H. Stresau, J. E. Kennedy. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
22. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 125, 3220.
23. Б. А. Хасанов, А. А. Борисов, Б. С. Ермолаев и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
24. В. С. Соловьев, А. В. Аттетков, А. В. Бабкин и др.— В кн.: Детонация. Вып. II. Черноголовка, 1981.
25. D. V. Hayes. Eighth Internat. Collog. on Gasdynamics of Explosives and Reactive Systems. Minsk, 1981.
26. Е. Г. Баранов, О. И. Оберемок, Е. А. Семенюк. ФГВ, 1981, 17, 5.
27. R. E. Setchell. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
28. М. Я. Васильев. ФГВ, 1965, 1, 3.
29. V. M. Boyle, D. L. Pilarski. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
30. M. C. Chick, D. J. Hatt. Ibid.
31. V. M. Titov, V. V. Silvestrov, V. V. Kravtsov. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
32. Ch. Klee, D. Ludwig. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
33. С. А. Новиков, В. И. Шутов. ФГВ, 1980, 16, 2.
34. F. E. Walker, R. J. Wasley. Explosivestoffe, 1969, 17, 1.
35. Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. П. Погорелов и др.— В кн.: Детонация. Вып. II. Черноголовка, 1981.
36. С. А. Handle, J. R. Jumphrey a. o. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Maryland, 1981.
37. P. Howe, R. Frey a. o. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
38. D. V. Hayes. Ibid.
39. М. В. Баталова, С. М. Бахрах, В. П. Зубарев. ФГВ, 1980, 16, 2.
40. F. E. Walker. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
41. J. W. Nunziato, J. E. Kennedy, D. K. Hardesty. Ibid.
42. P. J. Chen, J. E. Kennedy. Ibid.

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА

Г. И. Канель, А. Н. Питюлин
(Черноголовка)

В настоящее время известно достаточно много экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению и расчетному описанию процессов ударно-волнового деформирования металлов, ионных кристаллов и других пластичных материалов. Вместе с тем совершенно недостаточно информации о поведении в этих условиях хрупких материалов, хотя реология таких сред значительно сложнее. В данной работе представлены результаты регистрации и анализа волновых профилей в модельном керамическом материале на основе карбида титана (80% по массе) с никелевой связкой. Образцы приготовлены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Для расчета объемной сжимаемости керамики методом смесей [1] определяли ударную адиабату чистого карбида титана. Измерения прово-

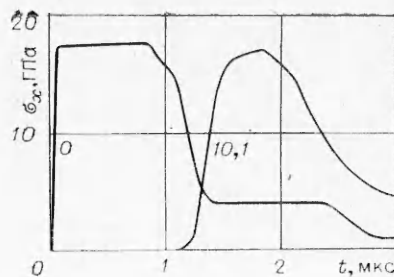
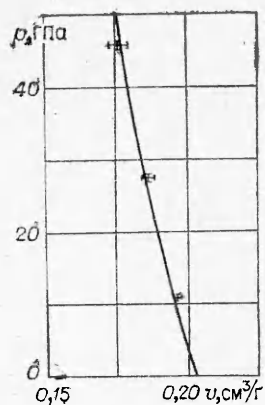


Рис. 3.

Рис. 1.

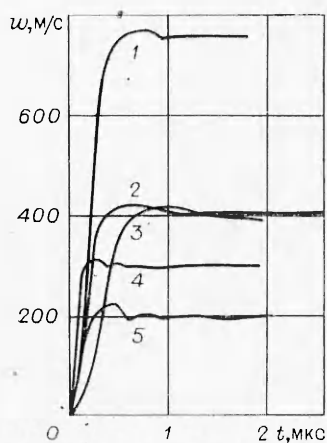


Рис. 2.

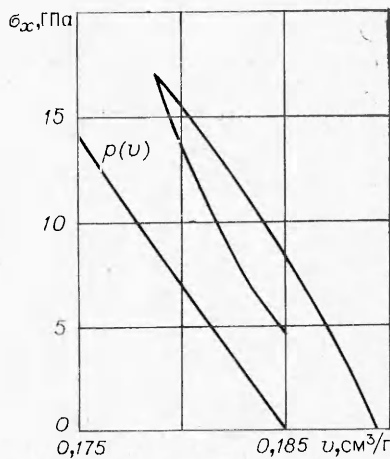


Рис. 4.

дили на смеси парафина и порошка карбида титана с размером частиц не более 100 мкм. Содержание TiC в образцах составляло 84,5% по массе (51% по объему), пористость образцов не превышала 1%, толщина составляла 5—6 мм. Образцы нагружали алюминиевыми ударниками толщиной 2—5 мм со скоростью 1,5—4,0 км/с. Измеряли скорость фронта ударной волны, остальные параметры ударного сжатия смеси находили методом отражения [2].

Результаты измерений объемной ударной сжимаемости карбида титана показаны на рис. 1 в координатах давление p — удельный объем v . При определении удельного объема TiC по измеренным состояниям для смеси использовали ударную адиабату парафина, полученную в [3]. С учетом результатов измерений «объемной» скорости звука [4] ударная адиабата карбида титана для давлений до 50 ГПа описывается соотношением $D = 7,0 + 1,4u$ (км/с), $\rho_0 = 4,93$ г/см³, где D — скорость фронта ударной волны; u — массовая скорость; ρ_0 — плотность.

Волновые профили в керамике регистрировали методами емкостного [5] и манганинового [6] датчиков на образцах толщиной 5—20 и диаметром ~ 90 мм. Измеренная $\rho_0 = 5,28$ г/см³, что несколько ниже расчетной плотности монолитной смеси карбида титана с никелем (5,40 г/см³). Как показали металлографические исследования, пористость материала составляла 0,5—1%. Некоторое снижение плотности может быть связано с уменьшением количества никеля в процессе синтеза материала. Продольная скорость звука в образцах $c_l = 9,15 \pm 0,1$ км/с.

На рис. 2 приведены результаты регистрации профилей скорости свободной поверхности $w(t)$ керамических образцов различной толщины h , нагружаемых алюминиевыми ударниками толщиной δ со скоростью w ,

(1 — $h = 10$ мм, $\delta = 4$ мм, $w_y = 1350$ м/с; 4 — $h = 4,8$ мм, $\delta = 2$ мм, $w_y = 600$ м/с; 5 — $h = 10$ мм, $\delta = 2$ мм, $w_y = 450$ м/с) или детонацией взрывной линзы в контакте с образцом (кривые 2, 3, $h = 10,3$ и 20 мм соответственно).

На профилях $w(t)$ видна значительная дисперсия фронта волны сжатия, возрастающая с увеличением толщины образца. Упругий предвестник в волне сжатия не выделяется. Прочность материала на разрыв невелика, поэтому откольные явления ограничивают уменьшение скорости поверхности образцов в падающей волне разрежения — торможение поверхности составляло 20—30 м/с, что соответствует откольной прочности 0,37—0,55 ГПа. Для сравнения можно отметить, что откольная прочность керамики без металлической связки и твердых минералов обычно не превышает 0,1 ГПа [7, 8], а прочность никеля составляет 1,5 ГПа [9].

Дисперсия фронта ударной волны может быть связана с высокой вязкостью или с аномальной сжимаемостью материала. В последнем случае при разгрузке сжатого вещества должна образовываться ударная волна разрежения [2]. На рис. 3 приведены профили продольного напряжения $\sigma_x(t)$, полученные с использованием манганиновых датчиков в условиях нагружения образцов ударом алюминиевой пластины толщиной 4 мм со скоростью 1,35 км/с. Толщина датчиков вместе с изоляцией (слода, лавсан) не превышала 0,15 мм. Между образцом и ударником располагался алюминиевый экран толщиной 4 мм. Числа на рис. 3 соответствуют расстояниям от экрана до контролируемого датчиком сечения образца. По условиям применявшегося способа взрывного метания к тыльной поверхности ударника примыкал слой парафина, в связи с чем регистрируемая разгрузка имела ступенчатый характер.

На профилях $\sigma_x(t)$ не наблюдается каких-либо особенностей, связанных с переходом от упругого к пластическому деформированию или с образованием ударной волны разрежения. Аномальный характер головной части волны разрежения определяется процессом упругопластической разгрузки в ударнике и экране. Отмеченное сглаживание прямоугольного импульса сжатия характерно для вязких материалов. Фронт волны разрежения фиксируется достаточно четко; его скорость в лагранжевых координатах равна $10,2 \pm 0,2$ км/с, что значительно превышает расчетное значение объемной скорости звука (7,7 км/с при $p = 17$ ГПа). Оценка продольной лагранжевой скорости звука в предположении постоянства коэффициента Пуассона дает величину $\sim 10,5$ км/с при давлении 17 ГПа, откуда можно заключить, что фронт волны разрежения имеет упругий характер, т. е. материал деформируется как упруговязкое тело.

Имея волновые профили в двух сечениях образца, можно в приближении простой волны рассчитать траекторию изменения состояния вещества на плоскости $\sigma_x - v$. Результаты такой обработки показаны на рис. 4, из которого видно, что деформация керамики сопряжена со значительным гистерезисом напряжений, достигающим до $\Delta\sigma = 4$ ГПа. Траектория изменения состояния не пересекает расчетную кривую всестороннего сжатия монолитной смеси карбида титана с никелем. Гистерезис может быть вызван как уплотнением материала, так и действием вязких напряжений. Хотя остается неясным, как разделить вклады этих факторов, по величине гистерезиса скорости деформирования можно грубо оценить характерную вязкость материала как $\eta \approx \Delta\sigma/2(\dot{v}/v_0) \approx 10^4$ кг/(м · с).

Таким образом, керамика на основе карбида титана с никелевой связкой в условиях ударно-волнового нагружения деформируется как упруговязкое тело с $\eta \approx 10^4$ кг/(м · с) и прочностью на разрыв $\sim 0,5$ ГПа. Для детального описания реологических свойств необходимо проанализировать механическое взаимодействие твердых частиц между собой и с металлическим связующим.

Поступила в редакцию 18/IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, И. А. Карпухин. ПМТФ, 1960, 3, 184.
2. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 2, 197.
3. Р. Мак-Куин, С. Марш, Дж. Тэйлор и др.— В кн.: Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973.
4. О. Андерсон.— В кн.: Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1968.
5. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ПТЭ, 1963, 1, 135.
6. Г. И. Канель. ВИНТИ, Деп. № 477—74.
7. L. Davison, R. A. Graham. Phys. Reports, 1979, 55, 4, 255.
8. D. E. Munson, R. J. Lawrence. J. Appl. Phys., 1979, 50, 10, 6272.
9. Г. И. Канель. ФГВ, 1982, 18, 3, 77.

О РАЗВИТИИ ПРОБОЯ В УДАРНО-СЖАТОМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ

Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов
(Москва)

Пробой в ударно-сжатом сегнетоэлектрике (СЭ) ограничивает энерговыделение взрывного преобразователя энергии на его основе [1—4]. В настоящей работе ставилась задача провести анализ развития в СЭ пробоя в зависимости от моды ударного нагружения — аксиальной и поперечной.

На рис. 1 дано схематическое изображение простейшего взрывного преобразователя сегнетоконденсатора. На рис. 2 показаны репродукции осциллограмм импульсов напряжения $V(t)$ (тока $I(t)$) в короткозамкнутой цепи аксиального и поперечного преобразователей, когда напряжение на электродах сегнетоконденсатора близко к нулю. Здесь показаны также импульсы $V(t)$ в разомкнутых цепях, когда напряжение заметно превышает электрическую прочность ударно-сжатого СЭ.

При поперечном нагружении увеличение напряжения на электродах приводит к сильному искажению начальной П-образной формы импульса. В аксиальном преобразователе форма $V(t)$ одинаково отлична от П-образной и в короткозамкнутой, и в разомкнутой цепи. Для последнего случая с целью объяснения и феноменологического описания наблюдаемых

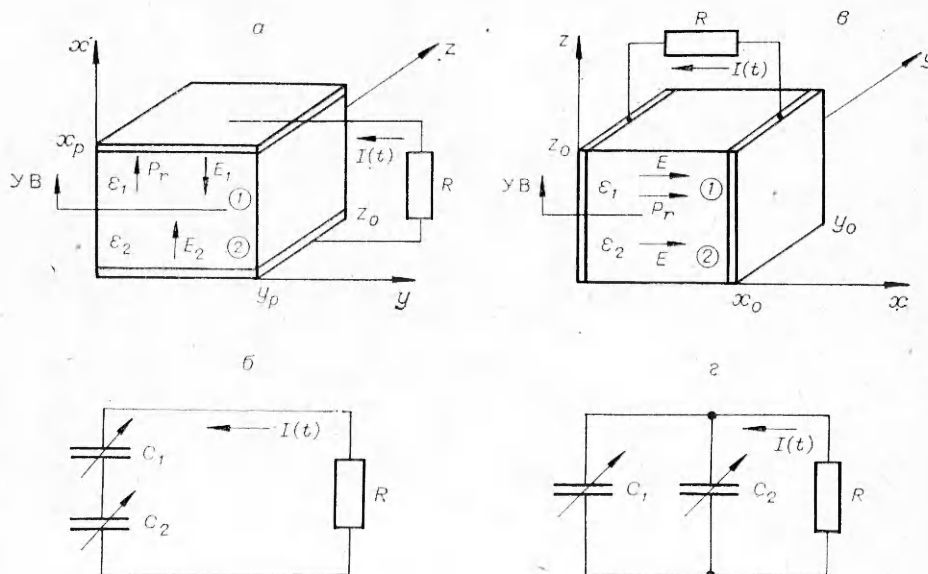


Рис. 1. Схематическое изображение (а, в) и эквивалентные электрические схемы (б, г) аксиального (а, б) и поперечного (в, г) преобразователей.

1 — несжатая зона; 2 — сжатая зона.