

05

Объемный солитон упругой деформации в поликарбонате

© Г.В. Дрейден, А.М. Самсонов, И.В. Семенова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: irina.semen@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2011 г.

Представлены результаты экспериментов по возбуждению и распространению объемных солитонов упругой деформации в волноводе (бруске) из поликарбоната, сделана оценка аномально низкого затухания такой нелинейной волны.

Наши недавние теоретические исследования и эксперименты доказали физическую возможность генерации и распространения объемных солитонов продольной деформации в волноводах, выполненных из нелинейно-упругих полимерных материалов — полистирола (ПС) и полиметилметакрилата (ПММА). Солитон деформации представляет собой мощную локализованную волну, переносящую упругую энергию на значительные расстояния практически без потерь. Нами было показано теоретически и установлено в экспериментах, что такая волна действительно может распространяться с сохранением формы на большие расстояния. Была зарегистрирована протяженная волна плотности постоянной формы, не имеющая волны разгрузки позади себя, идущая с постоянной скоростью, превышающей звуковую, и практически не затухающая даже на значительных расстояниях от места генерации [1].

Еще одним широко используемым стеклоподобным полимерным материалом является поликарбонат (ПК), что обусловлено удачной комбинацией его жесткости, прочности, ударной вязкости, пластичности, прочности на удар и прозрачности. Существенным преимуществом ПК является достаточно высокая по сравнению с другими полимерами температура стеклования (150°C), что обеспечивает возможность его использования при повышенных температурах. Основные механические параметры ПК сравнимы с параметрами ПС и ПММА, однако ПК

обладает значительно более высокой пластичностью. Согласно [2], у ПК вязкость разрушения составляет $2.2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ против 0.7–1.1 для ПС и 0.7–1.6 для ПММА, удлинение при разрыве — 100–120% против 1–4% для ПС и 3–5% для ПММА, а ударная вязкость — 65–1000 J/m против 13–25 для ПС и 10–20 для ПММА [2]. Наконец, коэффициент затухания линейных волн в ПК (величина, обратная длине промежутка, на котором амплитуда уменьшается в e раз) существенно выше, чем в ПС и ПММА (табл. 1).

Возможность существования и распространения длинных нелинейных волн на большие расстояния в полимерных материалах весьма важна при расчетах динамики конструкций. Для этого необходимо выяснить, как значительная вязкость и пластичность и связанный с ними коэффициент затухания упругих волн влияют на образование и распространение в материале объемных солитонов деформации, и сравнить это влияние с уже исследованными нами материалами — ПС и ПММА.

Для проведения экспериментов была использована установка для генерации и наблюдения уединенных объемных волн продольной деформации в упругих волноводах (см., например, [1]), состоящая из синхронизированного канала генерации уединенной волны из слабой ударной волны, полученной в результате взрывного вскипания тонкой пленки металла на подложке, и канала голографической регистрации волновой картины. В качестве образца использовался прямоугольный стержень из ПК производства фирмы Palsup, имеющий размеры $0.9 \times 0.9 \times 55 \text{ см}$. Волновые картины в волноводе регистрировались в трех областях, находящихся на расстояниях: 7–12 см, 12–17 см и 30–35 см от его входного торца.

В таблице 1 приведены упругие характеристики ПС, ПММА и ПК, важные с точки зрения генерации и распространения солитонов деформации в волноводах из этих материалов. Как было показано, например, в [3], определяющими для возникновения солитонов сжатия в материале с $\nu > 0$ являются знак и величина коэффициента нелинейности $\beta = 3E + 2l(1 - 2\nu)^3 + 4m(1 + \nu)^2(1 - 2\nu) + 6m\nu^2$, зависящего от модуля Юнга E , коэффициента Пуассона ν и модулей упругости третьего порядка (модулей Мурнагана — l , m , n). Формирование солитона сжатия в волноводе из такого материала возможно, если $\beta < 0$. Как видно из данных табл. 1, это условие выполняется для всех трех материалов. Заметим, что приведенные значения плотности,

Таблица 1. Упругие свойства материалов

Материал	Плотность ρ , g/cm ³	Модуль Юнга E , GPa	Коэффициент Пуассона ν	Модули упругости третьего порядка (модули Мурнагана)			Коэффициент нелинейности β , GPa	Скорость звука в стержне C_r , m/s	Коэффициент затухания линейных волн $\alpha(\text{lin})$, Np/cm
				l , GPa	m , GPa	n , GPa			
ПС	1.06	4.03	0.34	-18.9	-13.3	-10.0	-35.3	1870	0.23
ПММА	1.16	5.27	0.34	-10.9	-7.7	-1.4	-15.9	2080	0.57
ПК	1.19	2.36	0.40	-50	-12.2	-32	-42.37	1410	2.4

Таблица 2. Параметры волноводов из трех материалов и параметры сформировавшихся в них солитонов деформации

Материал	Показатель преломления n	Размеры волновода		Максимальная амплитуда солитона		Минимальная ширина солитона, mm	Коэффициент затухания солитона $\alpha(\text{sol})$, Np/cm
		сечение, cm	длина, cm	ΔK	A , 10 ⁻⁴		
ПС	1.59	1 × 1	57	1.0	1.78	34.2	0.005
ПММА	1.49	1 × 1	60	1.0	2.15	38.4	0.009
ПК	1.59	0.9 × 0.9	55	0.8	1.73	33.3	0.012

коэффициента Пуассона и скорости звука в стержне для ПК взяты из работы [4], значения модулей Мурнагана для ПК получены в результате пересчета модулей упругости третьего порядка, измеренных в [5], значения модуля Юнга для ПС и ПММА измерены по методике, описанной в [6], а значения модуля Юнга для ПК измерено производителем материала ([7]). Коэффициенты затухания линейных волн приведены согласно [8].

На рис. 1 приведена голографическая интерферограмма солитона деформации в стержне из поликарбоната. Так же как в ПС и ПММА, солитон выглядит как протяженная „корытообразная объемная волна“, за которой отсутствует какая-либо волна разрежения. Амплитуда

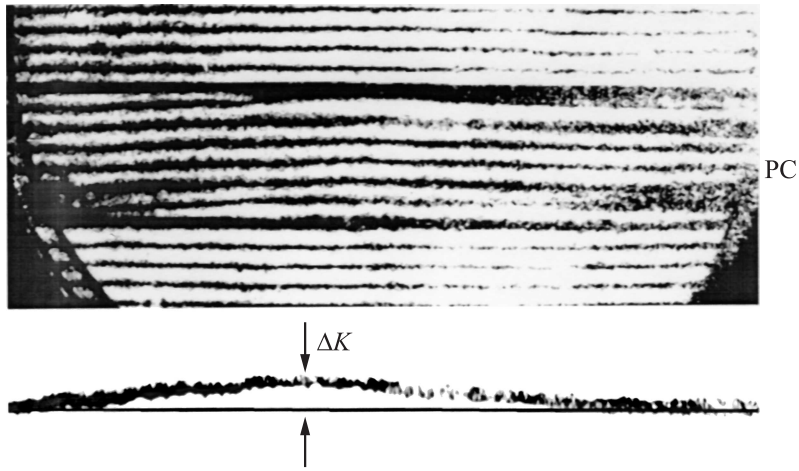


Рис. 1. Голографическая интерферограмма солитона деформации в стержне из поликарбоната (PC) на расстоянии 7–12 см от входного торца. На сноске под интерферограммой показан ход одной интерференционной полосы, вертикальный масштаб на сноске увеличен в 2 раза для наглядности.

солитона A в ПК (рассчитанная по значениям сдвига полос ΔK на интерферограмме по формуле (1), см. [1]) немного меньше, чем в ПС и ПММА (табл. 2):

$$A = \frac{\Delta K \lambda}{h(n_1 - 1)(1 - \nu)}. \quad (1)$$

Здесь λ — длина волны регистрирующего лазера, n_1 — показатель преломления полимерного материала, а ν — его коэффициент Пуассона, h — толщина стержня вдоль регистрирующего пучка света. Коэффициент затухания α солитона деформации определяется по обычной формуле:

$$\alpha = [1/(x_2 - x_1)] \ln(\Delta K_1/\Delta K_2), \quad (2)$$

где x_1, x_2 — координаты точек измерений амплитуд, а ΔK_i — максимальные сдвиги полос, измеренные на этих расстояниях.

При продвижении по стержню форма солитона претерпевает изменения, аналогичные тем, которые были зафиксированы в ПС и ПММА [1], его амплитуда уменьшается, а ширина увеличивается

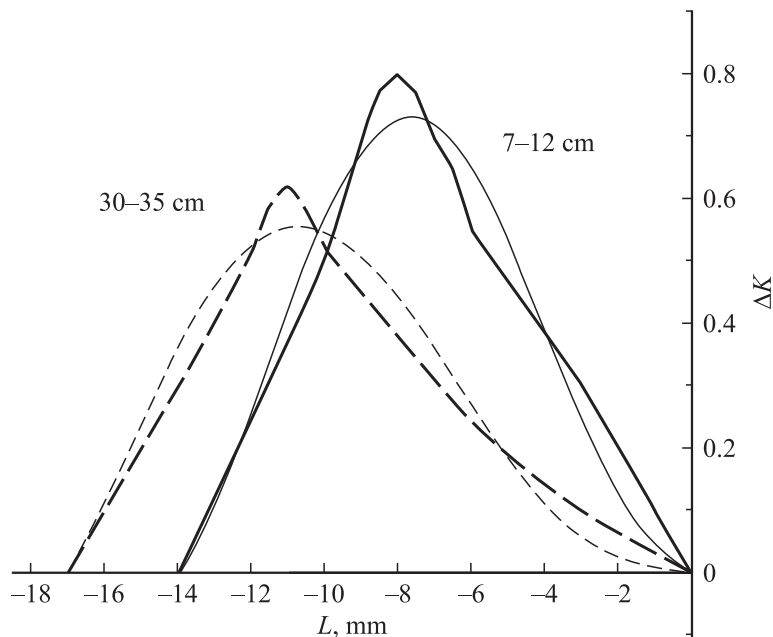


Рис. 2. Эволюция формы солитона при его распространении по стержню из ПК. Более тонкие линии построены в результате регрессионного анализа таблицы значений амплитуды солитона, взятых на тех же расстояниях от входного сечения.

(рис. 2). При этом „масса“ солитона, определенная как площадь под кривой, остается постоянной в пределах ошибки измерений. Кроме того, так же как в ПС и ПММА, при продвижении солитона по стержню из ПК передний фронт солитона сглаживается, а задний становится круче.

На рис. 3 приведены кривые изменения амплитуды солитонов деформации в трех исследованных материалах, характеризующие затухание солитона при его распространении вдоль стержня.

Коэффициент затухания α солитона деформации в ПК был определен по измерениям максимальных сдвигов полос на расстоянии 9 и 33 см от входного торца стержня. Полученное значение (0.012 Np/cm , табл. 2) лишь немного превышает полученные ранее значения для ПС (0.005 Np/cm) и ПММА (0.009 Np/cm), что свидетельствует о подобии

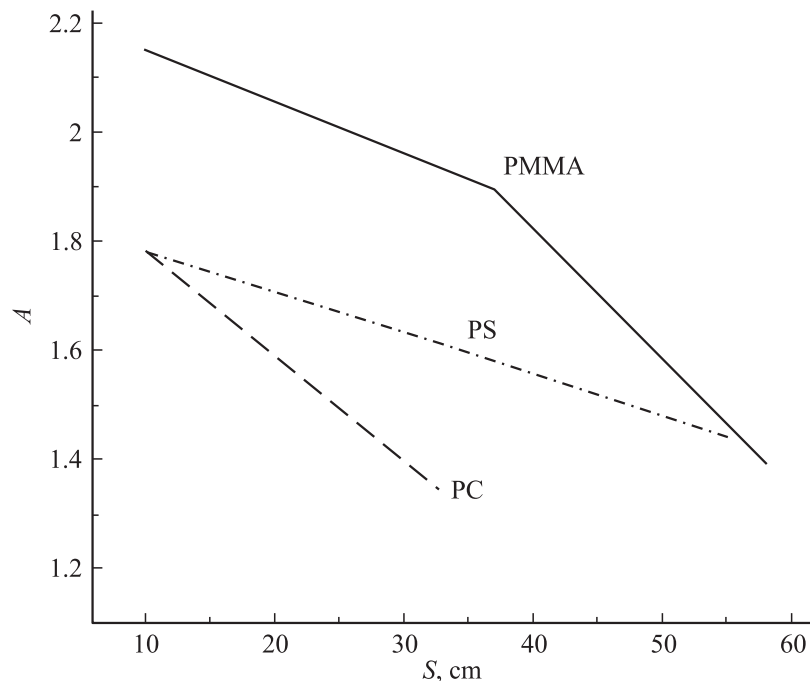


Рис. 3. Затухание солитонов деформации в стержнях из ПС, ПММА и ПК. Показано изменение амплитуды A солитона в зависимости от расстояния S , пройденного им от входного сечения волновода.

поведения объемных уединенных волн деформации в этих материалах. Важно отметить, что отличие в значениях коэффициентов затухания объемных солитонов и линейных волн в поликарбонате (200 раз) значительно больше, чем у полистирола (40 раз) и ПММА (60 раз), что говорит о значительно большей стабильности объемных длинных нелинейных волн (солитонов) деформации при распространении в ПК по сравнению с линейными ультразвуковыми волнами.

Таким образом, можно утверждать, что в волноводе из поликарбоната экспериментально установлено возникновение и распространение объемной длинной нелинейной упругой волны — солитона деформации, и оценено его затухание.

Авторы благодарят Б.К. Кардашева за измерение значений модулей Юнга для ПС и ПММА.

Список литературы

- [1] Дрейден Г.В., Самсонов А.М., Семенова И.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 8–14.
- [2] Brostow W. Mechanical properties // Physical properties of polymers handbook. J.E. Mark ed., Springer, 2007.
- [3] Samsonov A.M., Dreiden G.V., Porubov A.V., Semenova I.V. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. N 10. P. 5778–5787.
- [4] Millett J.C.F., Bourne N.K. // J. Mater. Sci. 2006. V. 41. P. 1683–1690.
- [5] Kruger J.K., Grammes C., Srockem K., Zietz R., Dettenmaier M. // Colloid Polym. Sci. 1991. V. 269. P. 764–771.
- [6] Кардашев Б.К., Никаноров С.П., Кравченко В.С., Малинов В.И., Пунин В.Т. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 11. С. 132–135.
- [7] PALSUN® Flat Polycarbonate Sheet. www.palram.com
- [8] Natioanl Physics Laboratory, UK: www.kayelaby.npl.co.uk