

УДК 539.3

ЗАТУХАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ОРГАНОПЛАСТИКЕ*С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, Л. А. Мержиевский,
А. Д. Реснянский**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск*

Проведено экспериментальное и расчетное исследование затухания плоской ударной волны в органопластике при ее взаимодействии с догоняющей волной разрежения. Измерения проведены с помощью манганиновых датчиков. Для расчета использована сформулированная ранее модель динамического деформирования композитов. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало их хорошее согласие.

Интерес к исследованию ударно-волновых процессов в конденсированных средах связан не только со стремлением изучить особенности их протекания. Более важно то обстоятельство, что с помощью ударно-волнового нагружения возможно достижение экстремально высоких термодинамических параметров состояния вещества. Установление связи между параметрами нагружения и характеристиками состояния дает экспериментальную информацию, необходимую для построения определяющих уравнений (уравнений состояния), замыкания моделей и проверки правильности расчетов.

Наиболее просто в таких исследованиях экспериментально определить связь между скоростью ударной волны (УВ) и массовой скоростью за ее фронтом. Цель таких измерений — построение ударных адиабат (адиабат Гюгонио) веществ. С их помощью оцениваются параметры состояния за фронтом стационарных УВ. С усовершенствованием экспериментальных методов (лазерная интерферометрия, манганиновые датчики и т. д.) стало возможным определение пространственно-временных распределений (профилей) характерных параметров — компонентов тензора напряжений, давления, массовой скорости. Анализ экспериментально полученных профилей этих величин позволяет дополнительно извлекать информацию о необратимых диссипативных потерях, связи прочностных характеристик с гидростатическим давлением, деформацией, скоростью деформации.

Основная часть большого количества работ данного направления посвящена исследованию поведения и свойств однородных изотропных материалов. Значительное внимание уделяется также пористым средам, так как при их исследовании можно существенно расширить диапазон достигаемых в экспериментах термодинамических параметров. Существенно меньше исследованы композитные материалы, особенно полимерные, хотя они и находят все большее применение в современных конструкциях и технологиях.

В данной работе экспериментально исследуется эволюция распространяющихся в органопластике ударных импульсов малой длительности при их взаимодействии с догоняющей волной разрежения. Процесс анализируется также численно на основе ранее сформулированной и апробированной модели, базирующейся на максвелловских представлениях о вязкоупругом поведении матрицы и армирующего материала. При построении модели использовался метод феноменологического осреднения, применение которого позволяет исключить обычно используемую при построении моделей

композитов гипотезу о регулярности структуры материала.

Постановка экспериментов и их результаты

Схема постановки экспериментов по исследованию затухания короткого ударного импульса в органопластике показана на рис. 1. Алюминиевый ударник 1 (толщиной 3 и диаметром 50 мм) разгонялся с помощью специально сконструированного и отработанного заряда взрывчатого вещества до скорости $v_0 = 1,56$ км/с. При ударе с такой скоростью по алюминиевой преграде в ней возникает УВ с амплитудой $\sigma = 14$ ГПа, а в органопластике 8–9 ГПа. Мишень состояла из алюминиевого экрана 2 толщиной 1,8 и диаметром 100 мм и набора из четырех пластин 4 из исследуемого композитного материала толщиной 3 и диаметром 60 мм каждая. Напряжение в образце регистрировалось манганиновыми датчиками 3, размещенными между пластинами.

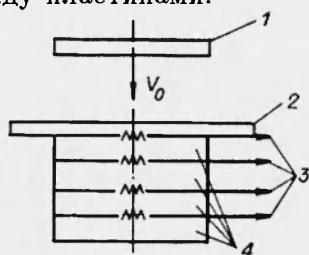


Рис. 1. Схема постановки экспериментов:

1 — ударник; 2 — алюминиевая пластина; 3 — пластины из исследуемого композита; 4 — манганиновые датчики.

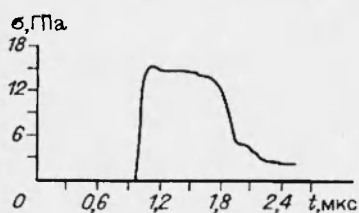


Рис. 2. Нагружающий импульс.

Для минимизации влияния различия акустических импедансов исследуемого материала и прокладок, изолирующих датчики, в экспериментах с композитами для изоляции использовалась лавсановая пленка толщиной 100 мкм и плотностью $1,39$ г/см³, а в экспериментах с алюминием — пленка из РТФЕ такой же толщины и плотностью $2,18$ г/см³. Большой диаметр экрана был необходим для отсекаания продуктов детонации, предохранения электрических выводов датчиков и выравнивания фронта нагружающего импульса. Датчики готовились из манганиновой проволоки — полоски толщиной ~ 15 мкм и шириной $0,5$ мм, которые припаивались к медным выводам толщиной 20 мкм и шириной $1,5$ мм. Максимальная толщина датчика в зоне контакта не превышала 40 мкм, электрическое сопротивление активного элемента $0,25$ Ом. Профили напряжения —

время регистрировалось двумя цифровыми осциллографами С9-27 с частотой дискретизации 50 МГц.

Ввиду различия акустических импедансов экрана и исследуемого материала при выходе УВ на контактную границу между ними происходит распад разрыва, при котором появляется слабая волна разрежения, распространяющаяся в экране навстречу нагружающему импульсу. Взаимодействие этих встречных волн усложняет профиль нагружающего импульса, что затрудняет интерпретацию данных записи первого датчика и сравнение характерных параметров нагружающего импульса с аналогичными измерениями других исследователей и результатами расчетов. Для устранения указанного недостатка были проведены дополнительные эксперименты, в которых пластины 4 заменялись на алюминиевые. Полученные при этом характеристики нагружающего импульса использовались в качестве опорных. Экспериментально зафиксированная форма нагружающего импульса показана на рис. 2.

Исследовался однонаправленный арамидно-волоконистый композит с матрицей из эпоксидной смолы. Толщина армирующих арамидных волокон 15 мкм. Образцы располагались так, что нагружение осуществлялось

поперек армирующих волокон. Полученные в экспериментах зависимости $\sigma(t)$ на различных расстояниях от нагружаемой поверхности показаны на рис. 3.

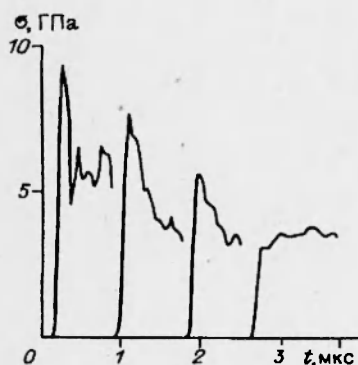


Рис. 3. Профили распространяющихся импульсов на различных расстояниях от нагружаемой поверхности.

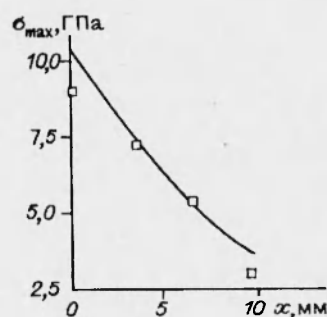


Рис. 4. Изменение максимальной амплитуды импульса по мере его распространения.

Образцы органопластика имели начальную плотность $\sim 1,14 \text{ г/см}^3$, что указывает на низкую степень однородности и наличие пустот (воздушных включений) в материале. Это проявляется в результатах экспериментов. В частности, этим объясняется наличие шумов на первой экспериментальной зависимости напряжения от времени (см. рис. 3), достигающих 50 % от полной амплитуды сигнала. Кроме того, максимальные амплитуды в этой серии экспериментов могли быть искажены скачками напряжения при прохождении измерительных пакетов.

Результаты измерения максимальной амплитуды напряжения σ_{\max} в зависимости от расстояния, пройденного УВ, показаны на рис. 4 (точки). Здесь же приведены данные, полученные в описываемых далее расчетах (кривая).

Численное моделирование ударно-волновых процессов

Для численного моделирования ударно-волновых процессов в органо-пластике воспользуемся разработанной ранее моделью композитного материала [1, 2].

Считаем, что известны объемные концентрации компонентов композита и все необходимые механические характеристики каждого из образующих композит материалов. Для составляющих композита справедливы соотношения (α — номер компонента)

$$\rho^\alpha \frac{\partial u_i^\alpha}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}^\alpha}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^\alpha}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^\alpha}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^\alpha}{\partial x_i} \right) = - \frac{\sigma_{ij}^\alpha - (1/3)(\sigma_{11}^\alpha + \sigma_{22}^\alpha + \sigma_{33}^\alpha)\delta_{ij}}{2\mu^\alpha \tau^\alpha}.$$

Здесь ρ^α — плотность; u_i^α — скорость; σ_{ij}^α — тензор напряжений; ε_{ij}^α — тензор упругих деформаций; τ^α — время релаксации касательных напряжений; μ^α — модуль сдвига. Напряжения связаны с деформациями законом Гука

$$\sigma_{ij}^\alpha = \lambda^\alpha (\varepsilon_{11}^\alpha + \varepsilon_{22}^\alpha + \varepsilon_{33}^\alpha) \delta_{ij} + 2\mu^\alpha \varepsilon_{ij}^\alpha \quad (2)$$

и могут быть также вычислены по упругому потенциалу E^α с помощью формул Мурнагана

$$\sigma_{ij}^\alpha = \rho^\alpha \frac{\partial E^\alpha}{\partial \varepsilon_{ij}}. \quad (3)$$

Для вычисления осредненных по элементарному объему характеристик состояния композита использовано правило смесей.

В случае волокнистых композитных материалов для средних величин из (1) и ряда гипотез получаем [1, 2]

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) &= -\varphi_{ij}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial t} = -\psi, \end{aligned} \quad (4)$$

где Δ — разность упругих деформаций составляющих композита вдоль направления волокон (параметр, характеризующий неравновесность упругих деформаций); φ_{ij} , ψ — релаксационные функции, ε_{ij} — упругие макродеформации композита, отсчитываемые от разгруженного состояния. Детальная структура уравнений (4) поясняется в [1, 2].

В случае слоистого композита число параметров, характеризующих неравновесность, увеличивается до трех, а система соответствующих уравнений принимает вид

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) &= -\varphi_{ij}, \\ \frac{\partial \Delta_1}{\partial t} = -\psi_1, \quad \frac{\partial \Delta_2}{\partial t} = -\psi_2, \quad \frac{\partial \Delta_{23}}{\partial t} &= -\psi_{23}, \\ \Delta_1 = (\Delta_{22} + \Delta_{33})/2, \quad \Delta_2 = (\Delta_{22} - \Delta_{33})/2. \end{aligned} \quad (5)$$

Системы (4), (5) дополняются соотношениями для обобщенного упругого потенциала, формулами Мурнагана и зависимостями для времени релаксации касательных напряжений для каждого из компонентов композита [3]. Для численного решения конкретных задач ударно-волнового деформирования использовалась специально разработанная модификация метода распада разрывов.

Рассмотрим решение задачи о распространении и эволюции плоских УВ в волокнистом композите, когда волна распространяется по направлению вдоль волокон, задаваемому пространственной осью x . Соответствующая система уравнений получается из (4) в предположении, что все функции зависят только от времени и одной пространственной переменной.

На рис. 5 показаны расчетные профили УВ в модельном медно-эпоксидном композите [4] в координатах (σ, x) и профили зависимостей характеристики несовместности Δ упругих деформаций материалов армирующих волокон и связующего на различные моменты времени. Расчет проведен при начальной неравновесности $\Delta_0 = 0,005$, концентрации волокон $c = 0,5$ и амплитуды массовой скорости $u_1 = 200$ м/с.

Наблюдающиеся в расчетах особенности структуры УВ находятся в полном соответствии с установленным в [2] характером диаграммы сжатия. Наличие трех участков на $\sigma - \varepsilon$ -диаграмме композита указывает на

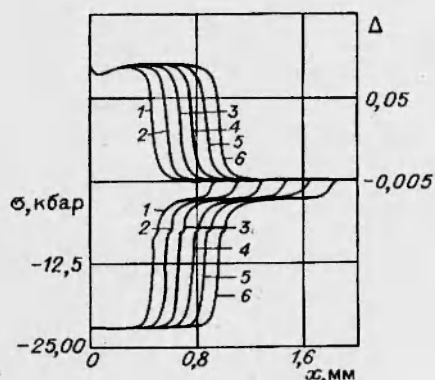


Рис. 5. Расчетные профили ударных волн в модельном медно-эпоксидном композите.

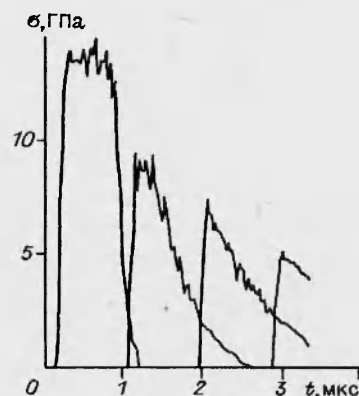


Рис. 6. Расчетные профили ударных импульсов в органопластике.

существование в материале трех типов возмущений, распространяющихся с различными скоростями — упругих, при которых матрица деформируется упруго, а армирующее волокно — пластически, и пластических. Это определяет расщепление УВ в композите на три последовательных скачка. Упругие свойства данного композита определяются, в первую очередь, упругими свойствами волокон, а эффективный модуль упругости близок к модулю Юнга волокна. Вследствие этого основная работа пластического формоизменения осуществляется во второй волне, и скорость ее распространения мало отличается от скорости пластической волны.

Ввиду иного соотношения упругих характеристик компонентов обсуждавшиеся выше особенности структуры фронта УВ в экспериментально исследованном материале проявляются менее четко.

Рассмотрим теперь решение задачи, постановка которой адекватна описанным выше экспериментам по исследованию затухания УВ при ее взаимодействии с догоняющей волной разрежения. В расчетах полностью воспроизводились условия экспериментов. В контрольных расчетах с алюминиевыми пластинами вместо композитных проверялась правильность работы программы и точность воспроизведения нагружающего импульса (сравнением с соответствующими описанными выше экспериментальными данными). Рассчитанные профили затухающего ударного импульса показаны на рис. 6. Сравнение с соответствующими экспериментальными профилями, приведенными на рис. 3, показывает хорошее качественное их подобие и совпадение количественных характеристик, во всех случаях, кроме первых профилей. Здесь длительности импульсов одинаковы, а максимальное значение амплитуды в эксперименте близко к среднему значению на расчетной «полочке» (9,1 и 10,5 ГПа), однако качественно импульсы различаются. По нашему мнению, эти различия могут быть связаны с некоторыми не обсуждавшимися здесь особенностями экспериментальной методики или с уже упоминавшейся неоднородностью структуры использованных в эксперименте образцов. Полученное в расчетах изменение амплитуды УВ по мере ее распространения показано на рис. 4 сплошной линией.

Заключение

Экспериментально исследовано затухание ударных волн в органоластике при их взаимодействии с догоняющей волной разрежения. Полученные экспериментальные данные дают новую информацию, характеризующую не только свойства самого материала. Она служит дополнительной основой для построения и апробации моделей. Здесь уместно напомнить, что аналогичные исследования для металлов внесли радикальные изменения в представления о механизмах ударно-волнового деформирования и дали основания для создания целого ряда новых моделей [5].

Результаты работы показывают также, что сформулированная в [1, 2] модель динамического деформирования композитных материалов хорошо описывает рассмотренный ударно-волновой процесс. Это подтверждает приемлемость использованных при конструировании модели принципов и гипотез и показывает перспективность развиваемого подхода для описания поведения композитных материалов и конструкций в условиях ударно-волнового нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда (грант RСС000).

ЛИТЕРАТУРА

1. Romensky E. I., Resnyansky A. D., Merzhievsky L. A. The model of viscoelastic composite // J. de Physique IV. Colloq. C3. 1991. V. 1, № 10. P. 923-930.
2. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д., Роменский Е. И. Модель динамического деформирования однонаправленных композитов // Докл. акад. наук. 1992. Т. 327, № 1. С. 48-54.
3. Мержиевский Л. А., Шамонин С. А. Построение зависимости времени релаксации касательных напряжений от параметров состояния среды // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1980. № 5. С. 170-179.
4. Мержиевский Л. А., Нижников О. А. Динамическое сжатие модельного однонаправленного композита // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 76-80.
5. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д. О выборе модели для описания затухания ударных волн в металлах // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 99-105.

Поступила в редакцию 29/VIII 1994 г.