

СТРУКТУРА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ОДНОНАПРАВЛЕННОМ КОМПОЗИТЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН

УДК 539.3

С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, Л. А. Мержиевский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева,
630090 Новосибирск

Экспериментально исследовались профили напряжения при распространении ударной волны в однонаправленном композите в случае, когда нормаль к поверхности фронта волны направлена под углом θ к армирующему волокну. При $\theta = 5$ и 15° зарегистрирован упругий предвестник, за которым распространяется ударный скачок. В случае $\theta = 45^\circ$ упругий предвестник трансформируется в пластическую волну с размытым фронтом, а при $\theta = 90^\circ$ зарегистрирована одиночная ударная волна. Результаты измерений показывают, что напряжение в точке перехода в текучее состояние зависит от взаимной ориентации волокна и направления движения ударной волны.

Прогнозирование поведения армированных волокнами полимерных композитных материалов при динамических нагрузках необходимо при проектировании конструкций из композитов, эксплуатируемых в экстремальных условиях. В последнее десятилетие такие задачи возникают все чаще ввиду расширения областей использования композитных материалов. Для их успешного решения необходимы модели композитов, адекватно описывающие их поведение в широком диапазоне изменения параметров нагружения (напряжений, деформаций и скоростей деформаций).

Ранее предложена и апробирована модель, основанная на максвелловском представлении о механизмах необратимого деформирования компонентов композита и на методе феноменологического усреднения для расчета эффективных характеристик композита как целого [1]. Результаты расчета по этой модели сравнивались с динамическими [2] и ударно-волновыми экспериментами [3], в которых образцы нагружались вдоль главных направлений модельного или конструкционного материала. Исследованные материалы характеризовались анизотропией механических свойств, которая наиболее выражена в однонаправленных композитах.

В [4] проведен численный эксперимент, в котором ударная волна (УВ) распространялась вдоль армирующих волокон. В этой работе установлен эффект расщепления ударных волн, вызванный различием скоростей распространения импульсов напряжения по материалам компонентов. Соответствующие экспериментальные данные в настоящее время отсутствуют. В данной работе поставлена задача зарегистрировать волновые профили в однонаправленном композите при движении УВ вдоль армирующих волокон и под углом к ним. Цель этих измерений, кроме определения структуры волны, – установление зависимости между скоростью волн и углом, который образуют между собой направление нагружения и волокно.

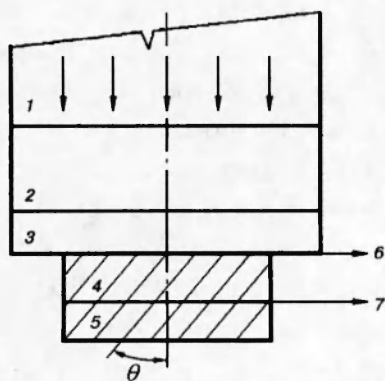


Рис. 1

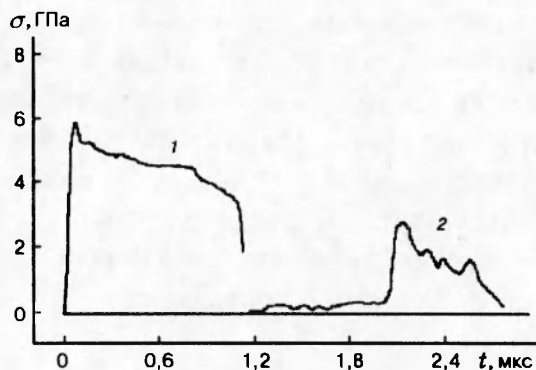


Рис. 2

Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — заряд ТНТ; 2 — парафин; 3 — медь; 4 — образец; 5 — нижняя пластина; 6, 7 — выводы манганиновых датчиков

Рис. 2. Профили $\sigma_i(t)$ на верхней (1) и нижней (2) поверхностях образца для $\theta = 5^\circ$

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента показана на рис. 1. Плосковолновая линза и промежуточный заряд из ТНТ создавали УВ в парафиновом блоке. Затем УВ проходила через медную пластину в образец, тыльная поверхность которого была закрыта нижней пластиной. Образец и нижнюю пластину изготавливали из исследуемого органического материала. Диаметр плосковолновой линзы и заряда ТНТ равен 75 мм, высота заряда 60 мм. Толщины парафинового блока и медной пластины составляли 20 и 10 мм соответственно. Такой выбор толщин обеспечивал время измерения в течение ≈ 5 мкс до прихода второй волны, отраженной от границы продуктов взрыва с парафином. За счет разницы динамических импедансов парафина и меди амплитуда УВ в образце уменьшалась до $3,8 \div 5,4$ ГПа в зависимости от плотности образца (табл. 1).

Образцы диаметром 48 и толщиной 7–8 мм изготавливали из однонаправленного арамидно-волокнутого композита с матрицей из эпоксидной смолы. Толщина армирующих волокон 15 мкм. Угол наклона нитей θ отсчитывали от нормали к поверхности фронта

Таблица 1

h, мм	ρ , г/см ³	θ , град	σ_{HEL}	$\sigma_{max,1}$	$\sigma_{max,2}$	c	u	t_0 , мкс
			ГПа					
7,62	1,27	5	0,2	5,4	2,8	5,9	3,6	0,8
7,75	1,27	15	0,15	4,8	2,4	6,0	3,1	1,2
7,33	1,27	15	0,15	4,4	2,3	6,1	3,3	1,0
7,9	1,14	45	0,5	3,8	1,3	3,2	3,0	0,25
9,5	1,14	45	0,5	4,0	2,0	3,4	2,9	0,35
	1,14	90	—	5	3	—	3,2	—
	1,14	90	—	5	3	—	3,5	—

волны (см. рис. 1). Напряжение в образцах регистрировали манганиновыми датчиками. Их конструкция и основные характеристики приведены в [3]. Датчики располагали в верхней и нижней плоскостях образца, и они записывали изменение нормального напряжения во времени $\sigma_i(t)$, где $i = 1$ или 2 для первого и второго профилей соответственно. Первый датчик располагали на границе между медной пластиной и образцом (он регистрировал входной импульс напряжения), второй — между тыльной поверхностью образца и нижней пластиной. Амплитуда зарегистрированного упругого предвестника оказалась низкой, поэтому для снижения уровня шумов датчики экранировали тонкой алюминиевой фольгой. Эксперименты проводили с образцами, у которых угол наклона нитей $\theta = 5, 15, 45$ и 90° .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ударная волна со спадающим профилем давления проходила из медной пластины в образец органопластика. Профиль $\sigma_1(t)$ имел крутой передний фронт, длительность которого не превышала временное разрешение измерительной системы, равное $\simeq 50$ нс (рис. 2). В некоторых случаях на переднем фронте сигналов наблюдался пик напряжения, амплитуда которого на $5 \div 20$ % превышала уровень сигнала, следующий за ним. Этот пик напряжения возникал за счет более высокого акустического импеданса лавсановой изоляции, в которую помещали пьезорезистивный элемент датчика. Длительность пика напряжения $\simeq 50$ нс, что соответствует времени реверберации акустической волны в датчике. Чтобы исключить влияние этого эффекта, максимальное напряжение в образце определяли путем экстраполяции профиля напряжения в точку, соответствующую моменту входа УВ в образец.

В зависимости от взаимной ориентации направления движения УВ и армирующих волокон наблюдалось три типа профилей $\sigma_2(t)$. При $\theta = 5$ и 15° — резко выделенный упругий предвестник и следующий за ним основной скачок напряжения с крутым фронтом (рис. 3, 1). При $\theta = 45^\circ$ — упругий предвестник, плавно переходящий в пластическую волну с размытым фронтом (рис. 3, 2), и при $\theta = 90^\circ$ — УВ с крутым фронтом $\simeq 50$ нс (рис. 3, 3).

Упругий предвестник отчетливо наблюдался при $\theta = 5$ и 15° . Его скорость равнялась $\simeq 6$ мм/мкс и в 1,7–1,8 раза превышала скорость основного скачка напряжения. Поэтому при толщине образца 7,5 мм упругий предвестник уходил вперед примерно на 3 мм от фронта пластической волны. Предвестник имел сложную структуру: его амплитуда в течение первых $\simeq 0,55$ мкс была постоянной, а затем в течение $\simeq 0,45$ мкс плавно нарастала. На записи сигнала (см. рис. 3,1) можно выделить точку, соответствующую состоянию начала текучести или упругому пределу Гюгонио, длительность фронта основного скачка напряжения при $\theta = 5$ и 15° не более временного разрешения аппаратуры. Качественно это соответствует результатам [4].

Упругий предвестник примерно в три раза меньшей амплитуды наблюдался и при $\theta = 45^\circ$, но его скорость так же, как и скорость основной волны, уменьшилась (см. рис. 3,2). Последняя уменьшилась на 28 %, что превышает как инструментальную ошибку измерения скорости $\simeq 5$ %, так и разброс результатов от опыта к опыту, который достигал $\simeq 10$ %. При таких условиях нагружения профиль основной волны характерен для пластической волны, так как длительность ее фронта увеличилась до $\simeq 160$ нс. В опытах с $\theta = 90^\circ$ упругий предвестник не наблюдался, а длительность фронта второго профиля

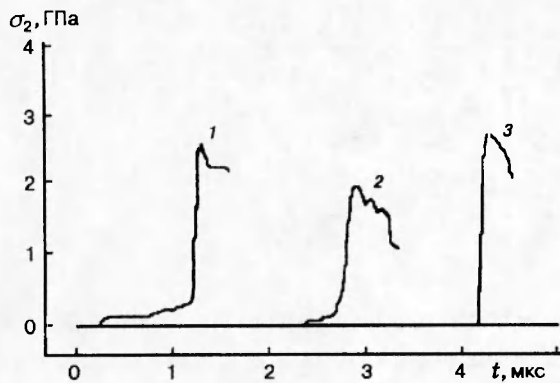


Рис. 3

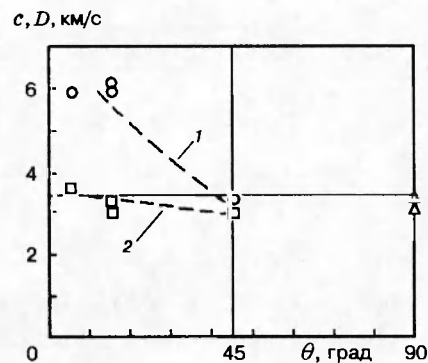


Рис. 4

Рис. 3. Профили напряжение — время на нижней поверхности образца при $\theta = 15^\circ$ (1), 45° (2) и 90° (3)

Рис. 4. Зависимости скоростей упругого предвестника (1) и пластической волны (2) от угла наклона армирующих нитей

примерно равнялась временному разрешению системы (см. рис. 3,3).

В табл. 1 приведены условия проведения опытов и результаты измерений. Использовались следующие обозначения: h — толщина образца; ρ — его плотность; σ_{HEL} — упругий предел Гюгонио; $\sigma_{\max,1}$, $\sigma_{\max,2}$ — максимальные амплитуды напряжения для первого и второго профилей соответственно; c — скорость упругого предвестника; u — скорость фронта основной волны либо скорость распространения нижнего уровня напряжения в пластической волне; t_0 — длительность упругого предвестника. В двух нижних строках табл. 1 приведена скорость УВ из работы [3], в которой измерялось затухание УВ в однонаправленном органопластике при нагружении образцов поперек волокон. По данным табл. 1 построены зависимости скоростей упругого предвестника и основной волны от угла θ (рис. 4), который показывает выраженный эффект расщепления УВ в диапазоне $\theta = 5 \div 45^\circ$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемый материал является трансверсально-изотропным [1] и характеризуется пятью независимыми модулями упругости. Закономерности необратимого (пластического) деформирования такого материала сложнее, чем условия текучести изотропных тел. Для качественного анализа полученных результатов, относящихся к случаю одноосного напряженного состояния, используем наиболее простые модельные представления. Вначале рассмотрим результаты экспериментов при $\theta = 5$ и 15° . Будем считать материал условно однородным с некоторыми усредненными по объему механическими свойствами. Кроме того, можно считать, что все направления в плоскости, перпендикулярной волокнам, равнопрочны. Тогда скорость продольной упругой волны можно представить в виде [5]

$$c^2 = E(1 - \mu)/\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu), \quad (1)$$

Таблица 2

Условия нагружения	Материал	E , ГПа	Y , МПа	τ , МПа
Статика ($\nu = 0,45 \div 0,75$)	Волокно	110-160	2400-4200	—
	Матрица	2	130-160	—
	Композит	78-95	280-310	20-44
УВ ($\nu = 0,30$)	Композит	33	80-110	15

где E — эквивалентный модуль упругости композита в направлении армирования; μ — эквивалентный коэффициент Пуассона, характеризующий деформацию по толщине при нагружении образца в направлении армирования; ρ — средняя плотность композита.

Эквивалентный модуль упругости композита при условии, что коэффициенты Пуассона для волокна и матрицы практически одинаковы, может быть рассчитан по правилу смеси [6]

$$E = \nu E_f + (1 - \nu) E_m \simeq \nu E_f, \quad (2)$$

где E_f и E_m — модули волокна и эпоксидной матрицы соответственно, ν — объемная доля волокна.

Из-за отсутствия данных по статическим тестам материалов, использованных в работе, сравнение механических свойств компонентов арамидных композитов при ударном нагружении с соответствующими характеристиками при статических испытаниях проводилось по данным [7, 8]. Результаты приведены в табл. 2. В ней представлены значения модуля упругости композита, рассчитанные по уравнениям (1), (2) и по скорости упругого предвестника при $\theta = 5^\circ$. При сравнении с результатами ударно-волнового нагружения необходимо учесть, что в статических тестах объемное содержание волокна было выше. Корректировка наших результатов с учетом этого фактора дает для E диапазон от 50 до 82 ГПа, который перекрывается диапазоном статического модуля упругости для арамидного композита. Это позволяет сделать вывод, что скорость упругого предвестника определяется свойствами волокна, в частности высоким значением модуля Юнга и объемным содержанием волокна. Другой величиной, измеряемой в эксперименте, является амплитуда упругой волны или упругий предел Гюгонио. В рамках сделанных выше предположений, значение σ_{HEL} связано с усредненным пределом текучести материала соотношением [9]

$$Y = \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} \sigma_{HEL}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) и данных табл. 1 получена оценка для Y при ударном нагружении с углом $\theta = 5^\circ$. Сравнение со статическими механическими характеристиками [7, 8] показывает, что эта величина наиболее близка к прочности связующего компонента — эпоксидной смолы, оставаясь, однако, примерно в 1,5 раза меньше статической прочности последней.

При $\theta = 15^\circ$ профиль упругого предвестника имеет сложную форму, которая заключается в увеличении его амплитуды с $\simeq 150$ до $\simeq 300$ МПа в течение второй половины общей длительности (см. рис. 3, 1). Такая структура позволяет выделить два уровня напряжений, соответствующих началу и полному переходу матрицы в текучее состояние. Отметим, что второй уровень напряжения практически совпадает со средней прочностью органокомпозита при статическом сжатии вдоль волокон [7].

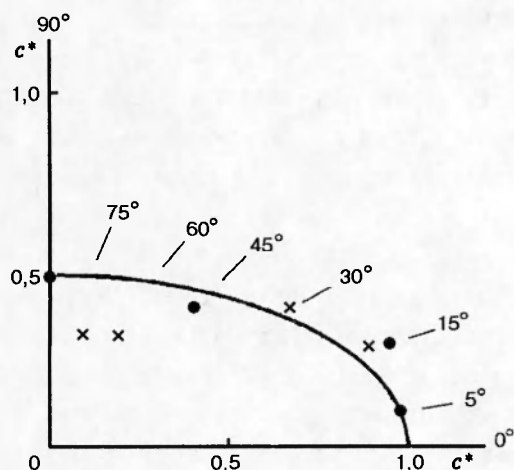


Рис. 5. Векторная диаграмма скоростей звука:

× — данные [10], • — данные из табл. 1;
 $c^* = c(\theta)/c(0)$

Обращает на себя внимание тот факт, что при $\theta = 5$ и 15° $c/u \simeq 1,8$, что близко к величине отношения скоростей упругих продольных и поперечных волн в однородном материале: $c_{el}/c_{tr} = \sqrt{3}$ [5]. В то же время, если основной скачок напряжения является пластической волной, т. е. материал в этой волне находится в текучем состоянии, то отношение скорости упругой волны к пластической в однородном материале будет $c_{el}/c_0 \simeq 1,3$ [9]. Значительное отклонение отношения c/u от последнего значения, по-видимому, вызвано более сложным механизмом деформирования во фронте основного скачка напряжения, чем пластический сдвиг. Естественно предположить, что наблюдаемый эффект связан с физической неоднородностью материала и с большим различием прочностных свойств волокна и материала матрицы. Так, прочность арамидных волокон, по различным данным, меняется от 2,4 до 4,2 ГПа [9], что значительно больше прочности эпоксидной матрицы. Поэтому при напряжениях выше упругого предела эпоксидного связующего в материале матрицы происходит пластический сдвиг, в то время как волокно при напряжениях до $\simeq 2 \div 3$ ГПа ведет себя упруго. Именно этот диапазон напряжений от 0,3 до 5,5 ГПа характерен для второй волны в настоящих опытах. Можно предположить, что пластическая деформация материала матрицы вызывает поперечные возмущения волокна, которые распространяются со скоростью упругих поперечных волн и «ведут» пластическую волну по материалу матрицы. При сжатии образца под углом 45° к направлению армирования максимальные сдвиговые напряжения возникают в плоскостях, совпадающих с направлением волокон. Поэтому если сдвиговые напряжения превышают межслоевую прочность, то в этих плоскостях возникает скольжение. В опытах с $\theta = 45^\circ$ амплитуда упругого предвестника уменьшилась в три раза по сравнению со случаем сжатия образца вдоль волокон и достигла значений на порядок ниже, чем прочность эпоксидной смолы в статических тестах. В табл. 2 проводится сравнение максимальных сдвиговых напряжений τ в плоскостях с $\theta = 45^\circ$, которые достигаются на фронте упругого предвестника, с данными по сдвиговой прочности арамидного композита в статических тестах [8]. Сравнение позволяет сделать вывод, что прочность межслоевого сдвига τ является определяющей величиной в механизме разрушения образца при $\theta = 45^\circ$.

Следует отметить, что полученные данные качественно согласуются с результатами [10], где исследовались закономерности распространения звука в однонаправлен-

ных графито-эпоксидных композитах. Сравнение полученных там результатов с данными табл. 1 приведено на рис. 5, где из общего центра отложены векторы скоростей распространения звуковых колебаний, отнесенные к скорости звука в направлении, совпадающем с направлением волокон. В проведенных опытах скорость звука при $\theta = 90^\circ$ принята равной скорости звука в материале матрицы. Сплошная линия на рисунке — аналитическая аппроксимация экспериментальных данных с помощью эллипса с осями 1 и $c(90^\circ)/c(0)$ соответственно.

Таким образом, полученные данные показывают, что прочность органокомпозита (напряжение в точке перехода в текучее состояние) при ударно-волновом нагружении зависит от взаимной ориентации волокна и направления движения УВ. Результаты исследования структуры УВ позволяют сделать вывод, что прочность определяется минимальным значением из полного набора прочностных характеристик отдельных компонентов. Так, при малых углах между направлением армирования и направлением распространения УВ, прочность определяется переходом в текучее состояние эпоксидной матрицы, а при углах нагружения 45° — межслоевым сдвигом в арамидном композите.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда и Правительства Российской Федерации (грант RCC 300).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д., Роменский Е. И. Модель динамического деформирования однонаправленных композитов // Докл. РАН. 1992. Т. 327, № 1. С. 48–54.
2. Мержиевский Л. А., Нижников О. А. Динамическое сжатие модельного однонаправленного композита // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 76–80.
3. Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д. Затухание ударной волны в органопластике // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 125–130.
4. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д., Роменский Е. И. Моделирование ударно-волновых процессов в однонаправленных композитах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 72–76.
5. Тимошенко С. Л., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975.
6. Hearn E. J. Mechanics of Materials. Oxford: Pergamon Press, 1977.
7. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В. В. Васильева, Ю. Н. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990.
8. Справочник по композиционным материалам / Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературные гидродинамические явления. М.: Наука, 1966.
10. Rose J. L., Wang A. S. D., Deska E. W. Wave profile analysis in a unidirectional graphite-epoxy plate // J. Composite Mater. 1974. V. 8, N 4. P. 419–424.

Поступила в редакцию 4/II 1997 г.