

Ударная сжимаемость и откольная прочность композита на основе кевлара и эпоксидной смолы

© А.В. Уткин, В.М. Мочалова, А.В. Савченко, В.Е. Брейкина

ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: utkin@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 7 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 25 марта 2025 г.

Принято к публикации 25 марта 2025 г.

Проведены экспериментальные исследования ударно-волновых свойств композита из арамидной ткани баллистической и эпоксидного связующего при продольной и поперечной ориентации волокон относительно направления распространения волны. Регистрация профилей массовой скорости осуществлялась методом лазерной интерферометрии. Показано, что ударная адиабата композита не зависит от ориентации волокон, и при 17 ГПа на ней наблюдается излом, свидетельствующий о химическом разложении. Наиболее яркой отличительной особенностью профилей скорости в образцах с продольной ориентацией волокон является наличие двухволновой конфигурации при давлении ударного сжатия ниже 12 ГПа. Показано, что откольная прочность композита на основе Кевлара при продольной ориентации волокон примерно вдвое выше, чем при поперечной, и равна 180 МПа.

Ключевые слова: композит, ударные волны, ударная адиабата, откольная прочность, Кевлар, эпоксидная смола.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60654.410-24

Введение

Армированные волокнами полимерные композиты обладают высокой температурной и химической стойкостью, низким коэффициентом теплового расширения; их прочность и жесткость на единицу веса выше, чем у большинства металлов. По этой причине они широко используются в различных отраслях промышленности в качестве элементов конструкций. Такие композиты представляют собой гетерогенные анизотропные материалы, и их механические свойства зависят не только от структуры, состава и используемой матрицы, но и от ориентации волокон.

Анализ работ, посвященных изучению низко- и высокоскоростного воздействия на композитные материалы, содержащие различные типы волокон, включая углеродные, арамидные, стеклянные, сверхвысокомолекулярный полиэтилен [1–21], а также на их матрицу [22–30], показывает, что существует выраженная индивидуальная реакция композитов на импульсное воздействие. Ударно-волновые методы позволяют получить содержательную информацию о свойствах анизотропных гетерогенных материалов при экстремальных условиях нагружения.

Поскольку данные материалы находят широкое применение в различных конструкциях, подвергающихся интенсивным воздействиям, существенное значение имеет исследование их прочности при статических и динамических нагрузках. В экспериментах, проводимых при ударно-волновом воздействии, определяется прочность материалов при импульсном растяжении — откольная прочность. Знания компонентного состава и структуры

гетерогенных анизотропных материалов не достаточно для предсказания прочностных свойств композитов при различных условиях испытаний. Существенным может оказаться влияние и других свойств материалов, таких, например, как адгезия между наполнителем и матрицей. В работе [17] было показано, что при добавлении в кевлар всего 0.5 % нанотрубок порог начала разрушения увеличивается более чем на 30 % по сравнению с образцами из кевлара. Аналогичный результат наблюдался в [18] при ударно-волновом воздействии на кевларовые композиты с наноглиной, содержащие эпоксидную матрицу. Исследование откольной прочности эпоксидной смолы и композитов на ее основе показало, что добавки волокон, как правило, либо не влияют на величину откольной прочности эпоксидной смолы, либо существенно ее уменьшают [5,12,19,24,31,32]. Также для некоторых композитов показано, что величина откольной прочности данных материалов может существенно зависеть от направления распространения ударной волны относительно расположения волокон [12,33]. Гетерогенная структура композитов приводит к заметному усложнению динамики волновых взаимодействий, что не всегда позволяет использовать традиционные методы оценки величины откольной прочности. Необходимо, в частности, учитывать возможность формирования множественного откола, хорошо известного явления, которое рассматривается, например, в работах [34–36]. Такой характер разрушения наблюдался авторами [5] на сохраненных образцах композита кевлар/эпоксидная матрица, а также в работе [13] при регистрации движения образца

из UHMWPE-композита высокоскоростной камерой в процессе ударно-волнового воздействия.

Помимо откольной прочности, исследование образцов при высоких давлениях позволяет получить информацию об их ударной сжимаемости — ударную адиабату. Рядом авторов было показано, что, в зависимости от структуры, расположения и объемного содержания волокон в материале, его ударная адиабата может как зависеть, так и не зависеть от направления распространения ударной волны [5,7,10,12,37,38]. Например, для однонаправленного углепластика, содержащего более 60 weight% углеродных волокон, при давлении ниже 10 GPa регистрируется различное поведение композита в зависимости от его ориентации [7,9,39]. В однонаправленном композите на основе арамидных волокон [12], при их содержании порядка 65 %, различие ударной сжимаемости при продольной и поперечной ориентациях волокон наблюдается во всем диапазоне исследованных давлений — примерно до 35 GPa.

Таким образом, из анализа работ по исследованию композитов и их связующих при ударно-волновом воздействии видно, что в каждом случае наблюдается индивидуально выраженный отклик образцов, поэтому экспериментальное исследование композитных материалов при импульсном воздействии позволит выявить общие закономерности их сжимаемости, деформации и разрушения. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование ударной адиабаты и откольной прочности композита из арамидной ткани баллистической (кевлар баллистический) и эпоксидного связующего при распространении ударной волны в продольном и поперечном направлении относительно ориентации волокон. Актуальность и новизна работы обусловлены тем, что ранее ударно-волновые исследования этого композита не проводились, тогда как известны экспериментальные данные, полученные для аналогичного композита с иной структурой арамидного волокна [3,5]. Сопоставление результатов позволит выявить особенности реакции близких по составу материалов на импульсное воздействие.

1. Структура образцов из кевлара баллистического и эпоксидной смолы. Схема экспериментов

Исходные образцы композита представляли из себя пластины размером 50×50 mm, толщиной от 3 до 8 mm, изготовленные из 11–26 слоев арамидной ткани баллистической из параамидного волокна (плотность 255 g/m^2) и эпоксидного связующего L+EPH161 (рис. 1). Плотность арамидного волокна 1.45 g/cm^3 , эпоксидной смолы — 1.15 g/cm^3 . Содержание волокон по объему 50 %, по весу — 55.8 %. Пластины изготовлены методом вакуумной инфузии. Плотность образцов составляла 1.306 g/cm^3 . Поскольку композит является анизотропным, скорость звука зависит от направления распро-

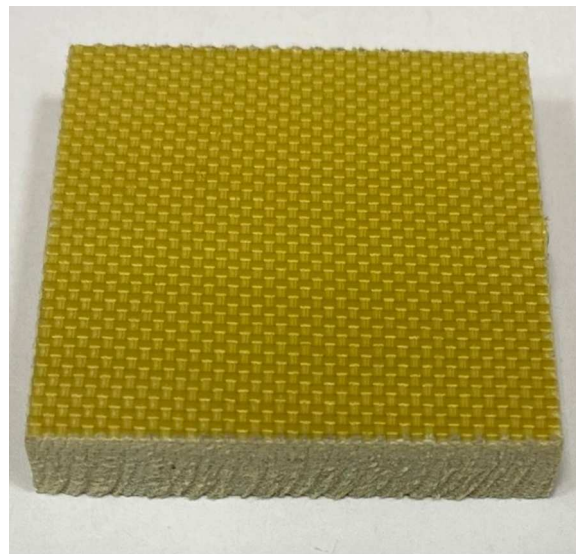


Рис. 1. Фотография пластины из кевлара баллистического.

странения волн. Для ее измерения использовалась ультразвуковая методика, с помощью которой получены следующие значения скорости звука: вдоль волокон $C_{\parallel} = (5.302 \pm 0.003) \text{ km/s}$, а в поперечном направлении $C_{\perp} = (2.661 \pm 0.003) \text{ km/s}$.

Ударно-волновое нагружение осуществлялось соударением с алюминиевыми пластинами, поэтому при использовании образцов, показанных на рис. 1, формируются ударные волны, распространяющиеся поперек волокон. Для исследования ударной сжимаемости вдоль волокон исходные пластины разрезались на полосы толщиной 8 mm и склеивались эпоксидной смолой таким образом, чтобы волокна были перпендикулярны плоскости образца.

Схема экспериментальной сборки показана на рис. 2. Разгон ударников 1 осуществлялся взрывными метательными устройствами. Ударные волны в исследуемых образцах 3 формировались при соударении алюминиевого ударника 1 диаметром 90 mm, разогнанного продуктами взрыва до скорости W_i , с экраном 2. Интерферометром VISAR [40] измерялась скорость движения границы образца с водой 4. Лазерное излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной $7 \mu\text{m}$, наклеенной на образец. Для определения абсолютного значения скорости отраженное излучение регистрировалось двумя интерферометрами с постоянными 280 и 1280 m/s. В каждом опыте поляризационным датчиком 5 фиксировался момент входа ударной волны в образец, что с использованием интерферометрических данных позволяло найти значение волновой скорости U_s . Погрешность определения U_s определяется точностью измерения толщины образца, равной $\pm 0.01 \text{ mm}$, и точностью регистрации времени прохождения ударной волны по образцу, которое задается характеристиками оборудования и равно $\pm 2 \text{ ns}$. Поскольку толщина образцов превышала 3 mm, а

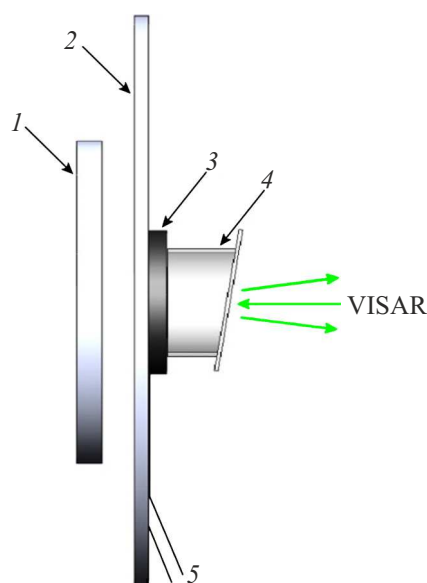


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — алюминиевый ударник, 2 — экран, 3 — образец, 4 — водяное окно, 5 — поляризационный датчик.

время регистрации $\sim 1 \mu\text{s}$, погрешность определения U_s составляла ± 0.5

Схема экспериментов для определения откольной прочности аналогична представленной на рис. 2, но водяное окно отсутствовало, и интерферометром регистрировалась скорость свободной поверхности. Для сохранения одномерного деформирования в течение всего времени регистрации ударно-волновых процессов [41] толщина образцов составляла от 3 до 4.5 mm, что на порядок меньше их диаметра. Соответственно количество арамидной ткани в образцах при исследовании откольной прочности составляло 11–15 слоев.

2. Ударно-волновая сжимаемость полимера на основе кевлара баллистического

Параметры экспериментальныхборок и результаты экспериментов по исследованию ударно-волновой сжимаемости кевлара баллистического при поперечной и продольной ориентации волокон приведены в табл. 1 и на рис. 3–7. В табл. 1 указаны скорость алюминиевого ударника W_i и его толщина h_i , материал и толщина экрана h_b , измеренная скорость ударной волны U_s , давление P и массовая скорость u_p . Давление и массовая скорость были рассчитаны по измеренным значениям W_i , U_s и известным ударным адиабатам материалов ударника и экрана.

На рис. 3 и 4 приведены профили скорости на границе образец/вода при поперечной ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны, на рис. 5 и 6 — при продольной. Цифровые обозначения

представленных зависимостей совпадают с нумерацией экспериментов в табл. 1. Кроме того, тонкими линиями (при $0 \mu\text{s}$) показаны входящие в исследуемые образцы импульсы сжатия, которые были измерены на границе экран/вода. Они обозначены теми же цифрами (со штрихами), что и соответствующие им эксперименты.

В опытах 1–5 и 8–12 использовались относительно толстые алюминиевые ударники — от 5 до 10 mm, поэтому после ударного скачка амплитуда входящей в образец ударной волны остается постоянной в течение от 0.8 до $2.4 \mu\text{s}$. В опытах 6, 7, 13 и 14 толщина ударников равнялась 2 mm, поэтому время существования постоянных значений скорости за ударной волной во входящем импульсе составляет $0.3 \mu\text{s}$. По мере распространения по образцу это время сокращается и к моменту выхода на границу с водой не превышает $0.1 \mu\text{s}$. Поэтому на зависимостях 6, 7 (рис. 4) и 13, 14 (рис. 6) область постоянных значений параметров незаметна, и за ударным скачком практически сразу

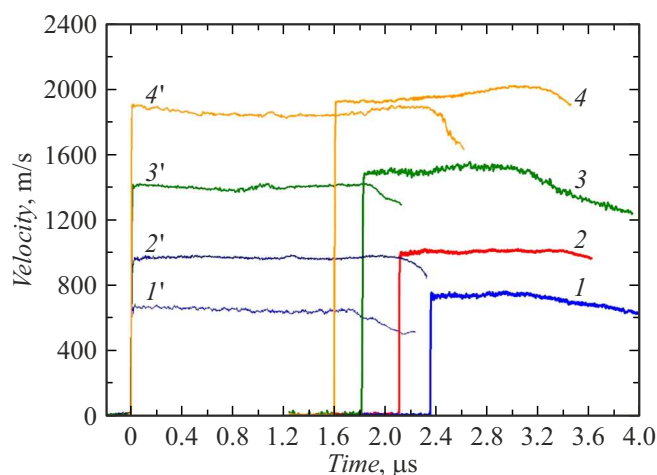


Рис. 3. Профили массовой скорости на границе композит/вода при поперечной ориентации волокон и давлении ниже 15 GPa.

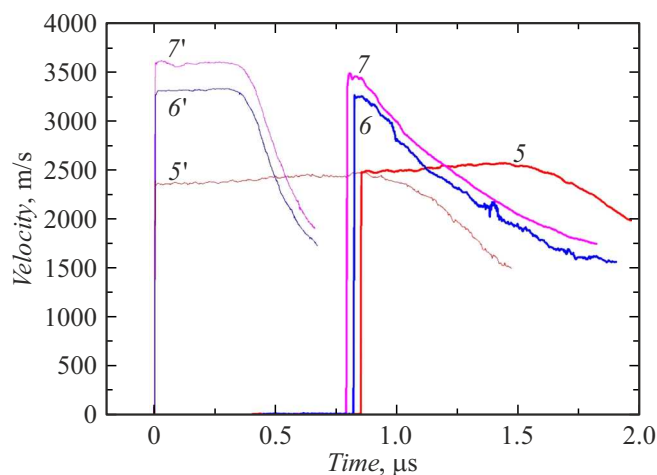
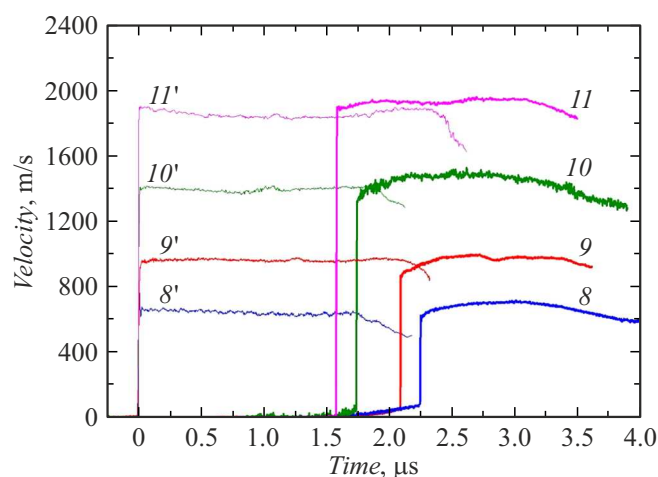
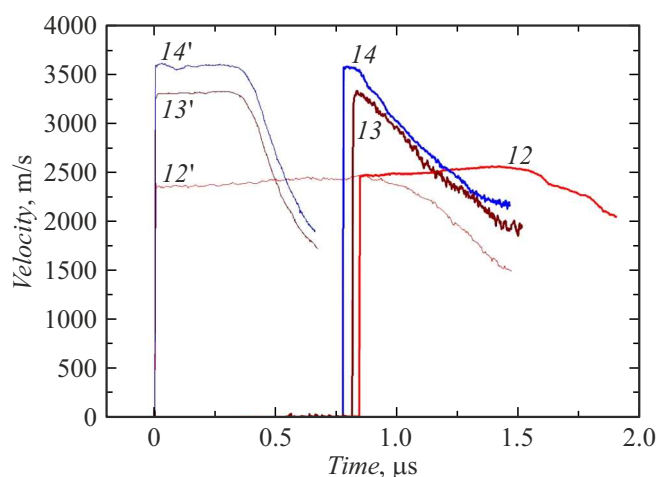


Рис. 4. Профили массовой скорости на границе композит/вода при поперечной ориентации волокон и давлении выше 15 GPa.

Таблица 1. Параметры и результаты экспериментов при определении ударной сжимаемости кевлара баллистического при различной ориентации волокон

№	W_i , km/s	h_i , mm	h_b , mm	h_s , mm	U_s , km/s	u_p , km/s	P , GPa	V , cm ³ /g
Поперечная ориентация волокон								
1	1.13	7	Cu, 5.5	7.90	3.61 ± 0.05	0.60 ± 0.02	2.83 ± 0.05	0.638 ± 0.006
2	1.13	7	Al, 4.0	7.85	3.93 ± 0.05	0.85 ± 0.02	4.36 ± 0.05	0.600 ± 0.006
3	2.50	10	Cu, 5.5	7.95	4.70 ± 0.05	1.34 ± 0.02	8.23 ± 0.05	0.547 ± 0.006
4	2.50	10	Al, 4.0	7.92	5.41 ± 0.05	1.77 ± 0.02	12.51 ± 0.10	0.515 ± 0.006
5	3.30	5	Al, 4.0	4.43	5.97 ± 0.05	2.30 ± 0.05	17.93 ± 0.15	0.471 ± 0.006
6	4.60	2	Al, 2.0	4.40	6.48 ± 0.05	3.21 ± 0.05	27.17 ± 0.20	0.386 ± 0.006
7	5.05	2	Al, 2.0	4.30	6.72 ± 0.05	3.51 ± 0.05	30.80 ± 0.20	0.366 ± 0.006
Продольная ориентация волокон								
8	1.13	7	Cu, 5.5	7.50	3.59 ± 0.05	0.60 ± 0.02	2.81 ± 0.05	0.638 ± 0.006
9	1.13	7	Al, 4.0	7.55	3.85 ± 0.05	0.85 ± 0.02	4.27 ± 0.05	0.597 ± 0.006
10	2.50	10	Cu, 5.5	7.30	4.56 ± 0.05	1.35 ± 0.02	8.04 ± 0.05	0.539 ± 0.006
11	2.50	10	Al, 4.0	7.56	5.25 ± 0.05	1.78 ± 0.02	12.20 ± 0.1	0.506 ± 0.006
12	3.30	5	Al, 4.0	4.43	5.91 ± 0.05	2.30 ± 0.05	17.75 ± 0.15	0.468 ± 0.006
13	4.60	2	Al, 2.0	4.40	6.47 ± 0.05	3.20 ± 0.05	27.04 ± 0.20	0.387 ± 0.006
14	5.05	2	Al, 2.0	4.20	6.81 ± 0.05	3.49 ± 0.05	31.04 ± 0.20	0.373 ± 0.006

**Рис. 5.** Профили массовой скорости на границе образец/вода при продольной ориентации волокон и давлении ниже 15 GPa.**Рис. 6.** Профили массовой скорости на границе образец/вода при продольной ориентации волокон и давлении выше 15 GPa.

же наблюдается спад скорости. Следует отметить, что профили скорости, несмотря на гетерогенную структуру исследуемых образцов, достаточно гладкие.

Наиболее яркой отличительной особенностью профилей скорости в образцах с продольной ориентацией волокон относительно направления распространения ударной волны является наличие двухволновой конфигура-

ции при давлении ударного сжатия ниже 12 GPa (рис. 5). В этом случае в отличие от поперечной ориентации (рис. 3) на границу с окном сначала выходит первая волна, амплитуда которой равна примерно 60 m/s. Скорость ее распространения в пределах погрешности измерения совпадает со скоростью звука в продольном направлении волокон $C_{||} = 5.30$ km/s. Этот результат согласуется с

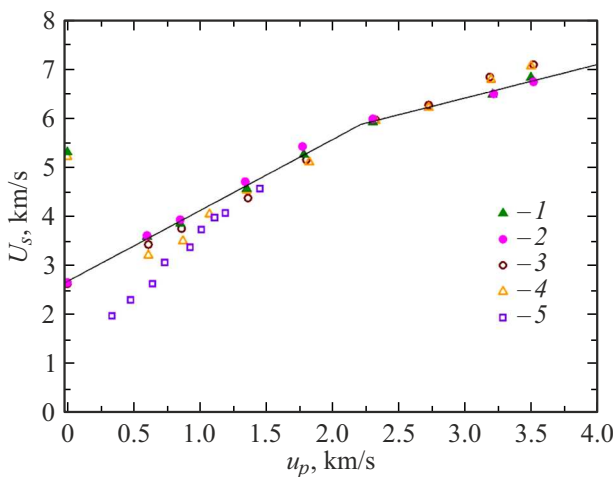


Рис. 7. Ударная адиабата кевлара баллистического при различной ориентации волокон: круглые точки — поперечная ориентация; треугольники — продольная ориентация: 1, 2 — настоящая работа; 3, 4 — работа [5], 5 — работа [3]. Сплошные линии — аппроксимация экспериментальных данных.

предыдущими работами, в которых исследовалась структура волновых профилей в композитах при распространении ударных волн вдоль волокон [5,12,13,39,42]. Вторая основная волна ударного сжатия распространяется с меньшей скоростью U_s . Время выхода этой волны на границу с окном определяется ее амплитудой и толщиной образца. При давлении, равном примерно 12.6 GPa, скорость второй волны достигает величины, совпадающей с $C_{||}$, и двухволновая конфигурация исчезает. Ударная волна при этом становится одиночной (опыты 12–14). Поскольку амплитуда предвестника мала по сравнению с максимальным значением скорости во второй волне, его наличие не приводит к заметному искажению профилей скорости, которые практически совпадают для обеих ориентаций волокон.

В результате обработки экспериментальных данных построена ударная адиабата для образцов кевлара баллистического с эпоксидной смолой при различной ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны. Результаты представлены на рис. 7 в координатах скорость ударной волны U_s — массовая скорость u_p . Также для сравнения приведены экспериментальные данные для композитов на основе кевлара с эпоксидной [5] и фенольной [3] матрицами. Круглые точки соответствуют поперечной ориентации, треугольники — продольной. Расхождение результатов, полученных для различной ориентации волокон, незначительно превышает погрешность экспериментов, поэтому ударную сжимаемость кевлара баллистического можно считать не зависящей от направления распространения ударных волн. При массовой скорости 2.2 km/s, что соответствует примерно 17 GPa, на зависимости $U_s(u_p)$ регистрируется отчетливо выраженный излом, что соответствует началу химической деструкции в композите. При $u_p < 2.2$ km/s

ударная адиабата хорошо аппроксимируется линейным $U_s(u_p)$ соотношением

$$U_s = 2.68 + 1.44 \cdot u_p, \text{ [km/s]},$$

в котором первый коэффициент с хорошей точностью совпадает с измеренной скоростью звука для поперечной ориентации волокон $C_{\perp} = 2.66$ km/s. Выше области излома рост скорости ударной волны от массовой скорости замедляется. При этом ударная адиабата при $u_p > 2.2$ km/s также может быть описана линейным $U_s(u_p)$ соотношением

$$U_s = 4.25 + 0.70 \cdot u_p, \text{ [km/s]}.$$

Химическая деструкция полимеров при ударно-волновом воздействии приводит к появлению особенностей на ударных адиабатах и рассматривается, например, в работе [43].

3. Откольная прочность композита на основе кевлара баллистического

Определение прочности образцов, состоящих из кевлара баллистического и эпоксидной смолы, при импульсном растяжении осуществлялось в условиях откольного разрушения при отражении импульсов сжатия от свободной поверхности тела [41]. В результате взаимодействия падающей и отраженной волн разрежения внутри образца возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к его разрушению. В настоящей работе использовался метод измерения сопротивления материалов откольному разрушению, основанный на регистрации скорости свободной поверхности образца. На рис. 8 показан характер изменения скорости при возникновении откола. Выход на свободную поверхность

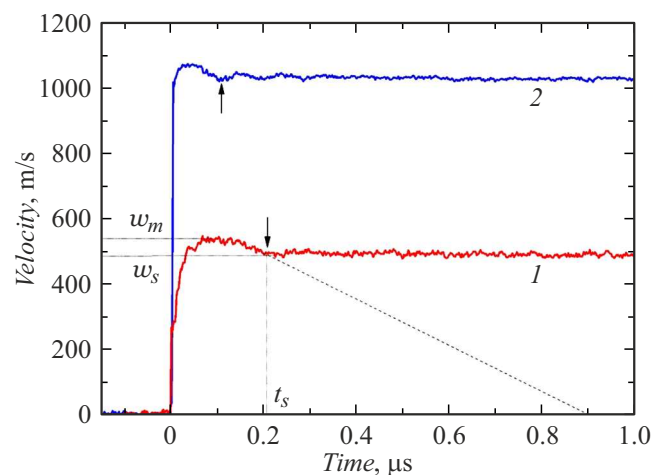


Рис. 8. Профили скорости свободной поверхности кевлара баллистического при поперечной ориентации волокон. Вертикальными стрелками отмечен момент выхода откольного импульса на свободную поверхность.

Таблица 2. Параметры и результаты экспериментов при определении откольной прочности кевлара баллистического при различной ориентации волокон

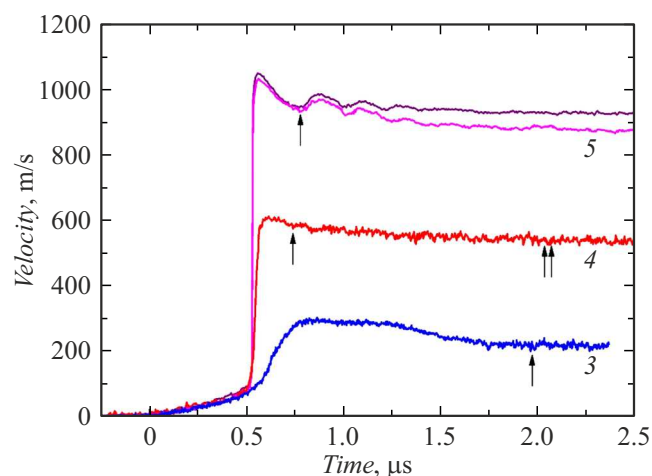
№	W_i , м/с	h_i , мм	h_b , мм	h_s , мм	ΔW , м/с	σ_s , МПа
Поперечная ориентация волокон						
1	650	0.4	ПММА, 2	2.97	58 ± 1	100 ± 1
2	650	2	ПММА, 2	4.35	50 ± 1	87 ± 1
Продольная ориентация волокон						
3	650	0.4	ПММА, 2	4.30	91 ± 1	158 ± 1
4	650	2	Cu, 2	4.40	$28/82 \pm 1$	$48/142 \pm 1$
5	650	2	ПММА, 2	4.45	104 ± 1	180 ± 1

ударной волны вызывает скачкообразное увеличение скорости поверхности до максимального значения W_m . Штриховой линией отмечено, каким образом изменялась бы скорость при отсутствии разрушения. Выход волны сжатия, формирующейся в результате откола, на свободную поверхность приводит к увеличению скорости и возникновению так называемого откольного импульса. На рис. 8 этот момент времени обозначен t_s и указан вертикальной стрелкой. Соответствующее значение скорости равно W_s . Анализ процесса взаимодействия падающей и отраженной волн разрежения методом характеристик дает соотношение между напряжением в плоскости откола σ_s и величиной спада скорости свободной поверхности $W_m - W_s$ [44]:

$$\sigma_s = 0.5\rho_0 C_0(W_m - W_s), \quad (1)$$

где ρ_0 , C_0 — соответственно плотность материала и объемная скорость звука в нем, совпадающая с $C_\perp$. Соотношение (1) справедливо для среды, не обладающей упруго-пластическими свойствами, и обычно используется для определения откольной прочности композитов [31].

Результаты определения откольной прочности и параметры экспериментальных сборок приведены в табл. 2. Обозначения величин такие же, как и в табл. 1. Измеренные профили скорости свободной поверхности показаны на рис. 8, 9. Цифровые обозначения профилей на рисунках соответствуют номеру опыта в табл. 2. Момент выхода откольного импульса на свободную поверхность отмечен вертикальной стрелкой. На рис. 8 представлены результаты для кевлара при поперечной ориентации волокон при двух различных давлениях ударного сжатия. При этом величина откольной прочности изменяется незначительно и не превышает 100 МПа. На профиле 2 достаточно отчетливо выражен откольный импульс, и наблюдаются последующие колебания скорости, обусловленные циркуляцией волн в откольной пластине. Диссипативные потери приводят к быстрому затуханию этих колебаний и установлению постоянной скорости

**Рис. 9.** Профили скорости свободной поверхности исследуемого композита при параллельной ориентации волокон. Вертикальными стрелками отмечен момент выхода откольного импульса на свободную поверхность.

движения откольной пластины. Интенсивность диссипации возрастает при уменьшении давления ударного сжатия, и на профиле 1 скорость остается практически постоянной после слабо выраженного откольного импульса.

На рис. 9 приведены профили скорости свободной поверхности для продольной ориентации волокон. В данном случае при выходе импульса сжатия на свободную поверхность регистрируется двухволновая конфигурация. Амплитуда первой волны выше значений, отмечавшихся в предыдущем разделе, и достигает величины около 100 м/с, что обусловлено разгрузкой в воздух, а не в воду. В опыте 5 регистрация скорости свободной поверхности образца осуществлялась в двух точках: в центральной части образца (коричневый профиль) и на расстоянии 10 мм от центра (розовый профиль), что равнялось половине расстояния от центра до боковой поверхности. Боковая разгрузка незначительно снижает

амплитуду импульса сжатия, но величина откольной прочности остается неизменной и равной 180 МПа. Заметным оказывается торможение откольной пластины, скорость которой снижается за несколько микросекунд примерно на 50 м/с.

В опыте 4 откольное разрушение образца выражено значительно менее отчетливо, чем, например, в опыте 5, и на профиле скорости свободной поверхности практически невозможно выделить откольный импульс. Одиной вертикальной стрелкой отмечен момент времени, после которого регистрируемый профиль скорости оказывается завышенным по отношению к исходному импульсу. Соответствующее значение растягивающих напряжений является в данном случае порогом начала разрушения, который равен 28 МПа и обозначен в табл. 2 первой цифрой. После начала разрушения скорость свободной поверхности продолжает уменьшаться, и это свидетельствует о том, что откольная пластина после начала разрушения не отделяется от основной массы образца. При этом растягивающие напряжения в плоскости откола продолжают возрастать. Двойной вертикальной стрелкой отмечено время, после которого заметный спад скорости отсутствует, и именно это значение полагалось равным W_3 . Величина откольной прочности в данном случае может быть определена лишь приблизительно, поскольку, как показано авторами [45], она зависит от кинетики откольного разрушения. В частности, в [45] отмечается, что при постоянной скорости разрушения можно использовать приведенное выше расчетное соотношение (1) для определения σ_s . Это дает для величины откольной прочности значение 82 МПа, которое приведено в табл. 2 второй цифрой. Похожий характер изменения скорости свободной поверхности наблюдается и в опыте 3, где также отсутствует откольный импульс. Вертикальной стрелкой в данном случае отмечен момент времени, после которого скорость остается постоянной.

Заключение

Полученные профили массовой скорости для образцов из кевлара баллистического в эпоксидной матрице показывают ряд особенностей, связанных с неоднородной структурой исследуемого материала, — при продольной ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны формируется двухволновая структура. Как и в других подобных анизотропных композитах [5,9,39], это реализуется при определенных давлениях ударного сжатия, когда U_s меньше скорости распространения возмущений вдоль волокон. Этот диапазон давлений зависит от величины скорости звука вдоль волокон. Например, в углепластике из-за более высоких значений скорости звука в углеродных волокнах и плотности материала двухволновая конфигурация может наблюдаться до давлений порядка 30 ГПа [39,42], тогда как в образцах из кевлара [5], как и в исследованных образцах на основе кевлара баллистического,

она регистрируется только до 12.2 ГПа. Когда скорость второй ударной волны становится сравнима или выше скорости звука в продольном направлении, в образцах распространяется одиночная ударная волна так же, как и при поперечной ориентации волокон.

Следует отметить, что на профилях массовой скорости не наблюдается никаких особенностей, которые свидетельствовали бы о химическом разложении кевлара. Так, например, зависимости 5 и 12 на рис. 4 и 6 демонстрируют волновой профиль, типичный для сред, в которых при ударно-волновом воздействии не происходит никаких химических превращений. В то же время в эпоксидной смоле, которая является связующим компонентом данного композита, ранее отмечалось, что химическая деструкция в окрестности 20 ГПа приводит к росту скорости за ударным скачком в течение нескольких десятков наносекунд [23]. Наличие арамидных волокон приводит к исчезновению этой особенности.

Проведя сравнение экспериментальных зависимостей скорости ударной волны U_s от массовой скорости u_p (рис. 7) для композитов на основе кевлара с различным типом матриц — эпоксидной [5] и фенольной [3] — можно отметить, что в исследуемом диапазоне скоростей наблюдается хорошее соответствие между приведенными данными. Небольшое различие, вероятно, обусловлено внутренней структурой конкретных образцов, которая наиболее ярко проявляется при низких давлениях. Начало химической деструкции в образцах из кевлара [5] и в исследованных образцах на основе кевлара баллистического, проявляющееся в виде излома на зависимости $U_s(u_p)$, происходит при одинаковых значениях массовой скорости $u_p = 2.2$ км/с.

Из табл. 2 видно, что величина откольной прочности исследуемого композита зависит от ориентации волокон. Максимальные значения σ_s реализуются при продольной ориентации волокон и не превышают примерно 180 МПа, что почти в два раза ниже прочности эпоксидной смолы [22,24,26], используемой в качестве связующего компонента. Это свидетельствует о том, что разрушение в условиях ударно-волнового воздействия происходит по границе волокно/матрица. При этом стоит отметить, что в композите с похожими составом и структурой [5] величина откольной прочности для двух ориентаций волокон практически не зависит от направления распространения ударной волны по материалу. Вероятно, в образцах из настоящей работы и статьи [5] наблюдается различная адгезия между слоями арамидной ткани и эпоксидным связующим. Так как ее величина, как правило, небольшая из-за низкой поверхностной энергии арамидного волокна, для повышения адгезионных свойств некоторые производители модифицируют поверхность волокон, а это, в свою очередь, может сказываться на величине откольной прочности σ_s полученного композита. Таким образом, из проведенных экспериментов видно, что, несмотря на близкий состав и структуру образцов, в каждом случае наблюдается индивидуально выраженный отклик материалов на импульсное воздействие.

Финансирование работы

Работа выполнена в соответствии с темой Государственного задания № 124020600049-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Katz, E. Grossman, I. Gouzman, M. Murat, E. Wiesel, H.D. Wagner. *Int. J. Impact Eng.*, **35**, 1606 (2008).
- [2] D.M. Dattelbaum, J.D. Coe, P.A. Rigg, R.J. Scharff, J.T. Gammel. *J. Appl. Phys.*, **116**, 194308 (2014). DOI: 10.1063/1.4898313
- [3] T. Homae, T. Shimizu, K. Fukasawa, O. Masamura. *J. Reinf. Plast. Compos.*, **25**, 1215 (2006). DOI: 10.1177/0731684406066370
- [4] A.V. Bushman, V.P. Efremov, V.E. Fortov, G.I. Kanel, I.V. Lomonosov, V.Y. Ternovoi, A.V. Utkin. *Mater.*, **1991**, 79 (1992). DOI: 10.1016/B978-0-444-89732-9.50018-2
- [5] V. Mochalova, A. Utkin, A. Savinykh, G. Garkushin. *Compos. Struct.*, **273**, 114309 (2021). DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114309
- [6] D.M. Dattelbaum, J.D. Coe. *The dynamic-loading response of carbon-fibre-filled polymer composites*. In: *Dyn. Deform. Damage Fract. Compos. Mater. Struct.* (Elsevier, 2023), p. 195–244.
- [7] J.C.F. Millett, N.K. Bourne, Y.J.E. Meziere, R. Vignjevic, A. Lukyanov. *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 3253 (2007). DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.03.034
- [8] W. Riedel, H. Nahme, K. Thoma. *Equation of state properties of modern composite materials: Modeling shock, release and spallation*, In: *AIP Conf. Proc.* (American Institute of Physics, 2004), p. 701–706. DOI: 10.1063/1.1780335
- [9] C.S. Alexander, C.T. Key, S.C. Schumacher. *J. Appl. Phys.*, **114**, 223515 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4846116>.
- [10] С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, Л.А. Мержиевский. *ФГВ*, **33**, 132 (1997).
- [11] А.В. Бушман, В.П. Ефремов, И.В. Ломоносов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. *TBT*, **28**, 1232 (1990).
- [12] V.M. Mochalova, A.V. Utkin, V.E. Rykova, M. Endres, D.H.H. Hoffmann. *Arch. Mech.*, **71**, 417 (2019). DOI: 10.24423/aom.3144
- [13] T. Lässig, F. Bagusat, S. Pfändler, M. Gulde, D. Heunoske, J. Osterholz, W. Stein, H. Nahme, M. May. *Struct.*, **182**, 590 (182). DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.031
- [14] S. Khatiwada, C.A. Armada, E.V. Barrera. *Procedia Eng.*, **58**, 4 (2013).
- [15] C. Frias, S.A. Macdonald, D. Townsend, N.K. Bourne, C. Soutis, P.J. Withers. 19th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Florida, **60** (8), M1–056 (2015).
- [16] S. Yang, V.B. Chalivendra, Y.K. Kim. *Compos. Struct.*, **168**, 120 (2017).
- [17] I. Taraghi, A. Fereidoon, F. Taheri-Behrooz. *Mater. Des.*, **53**, 152 (2014). DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.051
- [18] P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, Z.Y. Zhang, T. Benameur, M.O.W. Richardson. *Compos. Part B Eng.*, **46**, 7 (2013). DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.10.028
- [19] W. Xie, W. Zhang, L. Guo, Y. Gao, D. Li, X. Jiang. *Compos. Part B Eng.*, **153**, 176 (2018).
- [20] C. Pirvu, L. Deleanu, C. Lazaroaie. *Ballistic tests on packs made of stratified aramid fabrics LFT SB1*. In: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 2016: p. 012099. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/147/1/012099/meta> (accessed October 3, 2024).
- [21] M.J. Donough, B.G. Prusty, M.J. Van Donselaar, E.V. Morozov, H. Wang, P.J. Hazell, A.W. Philips, N.A. St John. *Int. J. Impact Eng.*, **171**, 104373 (2023).
- [22] В.М. Мочалова, А.В. Уткин, А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, С.С. Мокрушин. *ЖТФ*, **89**, 126 (2019).
- [23] V. Mochalova, A. Utkin, D. Nikolaev, A. Savinykh, G. Garkushin, A. Kapasharov, G. Malkov. *J. Appl. Phys.*, **136**, 045902 (2024). DOI: 10.1063/5.0217287
- [24] А.Е. Тарасов, Э.Р. Бадамшина, Д.В. Анохин, С.В. Разоренов, Г.С. Вакорина. *ЖТФ*, **88**, 34 (2018).
- [25] Т.А. Ростиллов, В.С. Зиборов. *TBT*, **60**, 922 (2022).
- [26] J.E. Pepper, J. Huneault, M. Rahmat, B. Ashrafi, O.E. Petel. *Int. J. Impact Eng.*, **113**, 203 (2018).
- [27] J. Huneault, J.E. Pepper, M. Rahmat, B. Ashrafi, O.E. Petel. *J. Dyn. Behav. Mater.*, **5**, 13 (2019). DOI: 10.1007/s40870-018-00180-w
- [28] R.C. Huber, J. Peterson, J.D. Coe, D.M. Dattelbaum, L.L. Gibson, R.L. Gustavsen, J.M. Lang, S.A. Sheffield. *J. Appl. Phys.*, **127**, 105902 (2020). DOI: 10.1063/1.5124252
- [29] R.C. Huber, D.M. Dattelbaum, J.M. Lang, J.D. Coe, J.H. Peterson, B. Bartram, L.L. Gibson. *J. Appl. Phys.*, **133**, 035106 (2023).
- [30] P.J. Hazell, H. Wang. *Shock response of polymer composites*. In: *Dyn. Deform. Damage Fract. Compos. Mater. Struct.* (Elsevier, 2023), p. 309–336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128239797000120> (accessed April 10, 2024)
- [31] F. Yuan, L. Tsai, V. Prakash, A.M. Rajendran, D.P. Dandekar. *Int. J. Solids Struct.*, **44**, (2007) 7731 (2007).
- [32] E. Zaretsky, G. DeBotton, M. Perl. *Int. J. Solids Struct.*, **41**, 569 (2004). DOI: 10.1016/j.jisstr.2003.09.026
- [33] А.В. Уткин, В.М. Мочалова, В.В. Якушев, В.Е. Рыкова, М.Ю. Шакула, А.В. Острик, В.В. Ким, И.В. Ломоносов. *TBT*, **59**, 189 (2021). DOI: 10.31857/S0040364421020137
- [34] А.В. Уткин. *ПМТФ*, **34**, 140 (1993).
- [35] А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, И.С. Гнутов. *ЖЭТФ*, **149**, 792 (2016).
- [36] Н.Х. Ахмадеев, Г.М. Гайнатулина. *Письма в ЖТФ*, **11**, 897 (1985).
- [37] D.C. Wood, G.J. Appleby-Thomas, A. Hameed, N.R. Barnes, A. Hughes, P.J. Hazell. *J. Mater. Sci.*, **53**, 11415 (2018). DOI: 10.1007/s10853-018-2431-0
- [38] P.-L. Hereil, O. Allix, M. Gratton. *J. Phys.*, **IV** (7), C3 (1997). DOI: 10.1051/jp4:1997391
- [39] V. Mochalova, A. Utkin, D. Nikolaev. *J. Appl. Phys.*, **133**, 240701 (2023). DOI: 10.1063/5.0151292
- [40] А.П. Кузнецов, С.А. Колесников, А.А. Голубев, К.Л. Губский, С.В. Дудин, А.В. Канцырев, В.И. Туртиков, А.В. Уткин, В.В. Якушев. *ПТЭ*, **3**, 116 (2011).
- [41] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (Янус-К, М., 1996)

- [42] V. Mochalova, A. Utkin, V. Sosikov, V. Yakushev, A. Zhukov. Shock Waves, **32**, 715 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s00193-022-01104-3>.
- [43] D.M. Dattelbaum, J.D. Coe. Polymers, **11**, 493 (2019).
DOI: 10.3390/polym11030493
- [44] С.А. Новиков, И.И. Дивнов, А.Г. Иванов. Физика металлов и металловедение, **21**, 608 (1966).
- [45] А.В. Уткин, В.А. Сосиков. ПМТФ, **46**, 29 (2005).