

05

Сопrotивление высокоскоростному деформированию и разрушению углерод-углеродного композита при ударно-волновом нагружении

© А.Р. Гареев,¹ Г.В. Гаркушин,² В.М. Мочалова,² С.В. Разоренов,² А.С. Савиных,² А.В. Уткин²

¹ Государственный научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита „НИИ графит“, 111524 Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: utkin@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 4 июля 2025 г.

В окончательной редакции 3 декабря 2025 г.

Принято к публикации 3 декабря 2025 г.

Определены ударная сжимаемость, структура фронта волны сжатия и откольная прочность однонаправленного углерод-углеродного композиционного материала УУКМ 1-D при распространении ударных волн под углами 0, 45 и 90° относительно ориентации волокон. С использованием лазерного интерферометра VISAR осуществлена регистрация профилей скорости свободной поверхности и массовой скорости на границе с водяным окном при одновременном измерении скорости распространения ударных волн. При распространении ударных волн под углами 0 и 45° зарегистрирована двухволновая конфигурация волнового фронта. Найдена зависимость ударной адиабаты и откольной прочности от направления ударно-волнового воздействия. При давлении ударного сжатия ~ 30 ГПа на ударной адиабате зарегистрирован излом, свидетельствующий о фазовом переходе в углероде. Показано, что исследованный композит не разрушается в области упругой деформации, а величина откольной прочности определяется его динамическим пределом упругости и превышает 1 ГПа. При пластической деформации образец УУКМ 1-D теряет упругие свойства, и его откольная прочность уменьшается на порядок независимо от ориентации волокон.

Ключевые слова: углерод-углеродный композит, ударная волна, ударная адиабата, динамический предел упругости, откольная прочность.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62655.169-25

Введение

Композиционные материалы с углеродной матрицей применяются в промышленности благодаря вариативности эффективных свойств. Их вид и свойства зависят от микроструктуры, кристаллической структуры в зависимости от условий синтеза матрицы (из газовой фазы, жидкой фазы), пористости на всех размерных уровнях материала, условий контакта. Теплопроводность таких материалов в зависимости от назначения варьируется от 0.15 W/(m·K) для теплозащиты до 1200 W/(m·K) в случае применения в конструкциях с активным отводом тепла. Композиты с углеродной матрицей применяются в ракетной технике, и наиболее сложным видом нагружения для них при эксплуатации можно считать термоудар, при этом теплопроводность является одной из характеристик, определяющих работоспособность материала. Учитывая высокие скорости воздействия тепловых потоков, для оценки возникающих состояний материала, в том числе оценки возможности возникновения ударной волны, необходимы корректные физические модели, основанные на экспериментальных данных, полученных в условиях, наиболее удобных для численных расчетов. Неоспоримым преимуществом в этом отношении обладают ударно-волновые методы исследования, позволяющие реализовать одномерное деформирование материа-

лов, которое строго анализируется в рамках основных законов сохранения.

Композиты на основе волокон различной структуры и химического состава характеризуются сильной анизотропией свойств, и их отклик на внешнее воздействие сильно варьируется в зависимости от степени наполнения, типа связующего [1–4], микроструктуры, пористости [5–8] и других особенностей их изготовления [9–11]. Композиционные материалы с углеродной матрицей не имеют возможности вариации армирующего наполнителя по химическому составу (как правило, наполнителем выступает углерод в виде непрерывных либо коротких волокон), ввиду того, что технология создания углеродной матрицы предполагает процессы термообработки при температурах свыше 2000 °C. В то же время как углеродный наполнитель, так и углеродная матрица имеют значительную вариацию физико-механических и теплофизических свойств, наследуемую на уровне кристаллической структуры от предшественника, из которого углерод был получен. Если рассматривать данный композиционный материал на уровне микроструктуры, то вариативность создания армирующих структур ограничена только существующими технологиями — намоткой углеродных нитей, многомерным плетением, выкладкой, хаотичным наполнением короткими нитями, получением армирующего наполнителя из углеродных

тканей. Надежно зарекомендовавшими себя в условиях термоудара являются композиционные материалы с углеродной матрицей, армированные углеродными нитями в трех и более направлениях [12].

За последние десятилетия появилось довольно большое количество работ, в которых экспериментально и теоретически исследуется поведение композиционных материалов на основе углеродных, стеклянных, арамидных волокон, сверхвысокомолекулярного полиэтилена и других волокон при воздействии ударной волны [2,4,8,13]. Исследуются волокна в различных матрицах, таких как эпоксидная смола, цианатный эфир, фенольная смола, поливинилхлорид [14–19], а также изучаются свойства самих матриц и матриц с включением различных добавок [20–25]. Большая часть экспериментальной информации о динамических свойствах армированных волокнами композитов при высоком давлении может быть найдена для случая, когда ударная волна распространяется перпендикулярно волокнам (90°), в меньшем количестве работ представлены данные для ударно-волновой нагрузки вдоль волокон (0°) и под разными углами относительно направления распространения ударной волны [5,9,10,26–30]. В работе [9] авторы представили экспериментальные профили, когда ударная волна распространялась через однонаправленный композит под разными углами к направлению армирования. Было показано, что упругий предвестник, за которым распространяется ударная волна, формируется при 5° и 15° . В случае удара под 45° упругий предвестник трансформируется в пластическую волну с размытым фронтом. Для ориентации 90° регистрируется одиночная ударная волна. Аналогичные результаты были получены другими авторами, например, [5,26,27,29,30] при исследовании композитов вдоль и поперек волокон — для образцов 0° наблюдалась двухволновая структура, а для перпендикулярного направления была зарегистрирована одиночная ударная волна. Такая же структура ударной волны для двух ориентаций волокон (0° и 90°) была получена в наших предыдущих работах для композитов на основе однонаправленных арамидных и углеродных волокон [7,31] и тканых арамидно- и углеродно-эпоксидных композитов [8,32].

Экспериментальные данные, полученные разными авторами, указывают на индивидуальную реакцию композиционных материалов при воздействии ударной волны. В такой ситуации важны экспериментальные исследования композитов на основе волокон различной природы для выявления общих закономерностей их деформации и разрушения при высоких динамических давлениях. Целью настоящей работы является экспериментальное определение ударной адиабаты и откольной прочности углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ 1-D) при различной ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны.

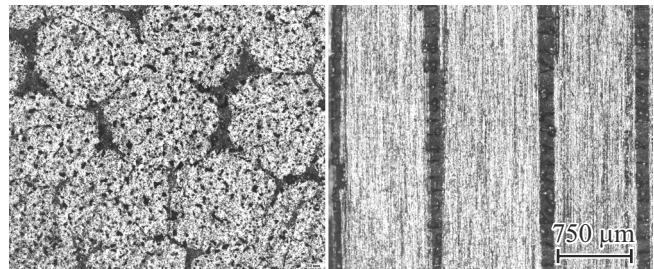


Рис. 1. Микроструктура углерод-углеродного композита УУКМ 1-D перпендикулярно волокнам (напряжение вдоль волокон) и вдоль волокон (напряжение перпендикулярно волокнам).

1. Структура образцов углерод-углеродного композита и схема экспериментов

На рис. 1 представлены фотографии микроструктуры исследуемых образцов. Структура композиционного материала представляет собой углеродные стержни на волокне марки УКН/5000 диаметром $(1.17 \pm 0.3) \text{ mm}$, расположенные в одном направлении, с последующим заполнением пространства между ними углеродным пеплом, который используется в качестве исходного сырья для получения углеродных волокон. Плоскопараллельные образцы толщиной 3.5 mm для ударно-волновых экспериментов вырезались электроэрозионным методом с последующей обработкой поверхности (шлифовка и полировка) из единой цилиндрической заготовки диаметром 30 mm , в которой углеродные волокна ориентированы вдоль образующей. При этом для получения образцов в опытах с поперечным направлением волокон заготовка разрезалась вдоль образующей. Следует отметить, что при нагружении поперек волокон образец включает не более трех стержней в направлении распространения ударной волны. Проверить экспериментально влияние толщины на полученные результаты не представляется возможным из-за ограниченного диаметра исходной цилиндрической заготовки. Поэтому для обеспечения одномерности течения максимальная толщина образца не могла превышать 3.5 mm .

Плотность измерялась методом гидростатического взвешивания и составила 1.84 g/cm^3 . Поскольку композит является анизотропным, скорость звука зависит от направления распространения волн. Для ее измерения использовалась ультразвуковая методика (МГНИВП „Акустика“), с помощью которой получены следующие значения: продольная скорость звука c_l вдоль волокон составила 11.44 km/s , перпендикулярно направлению волокон — 1.90 km/s , под углом 45° — 7.98 km/s .

Схема экспериментов по определению ударной сжимаемости (ударной адиабаты) углерод-углеродного композита приведена на рис. 2. Разгон ударников I осуществлялся взрывными метательными устройствами. Ударные

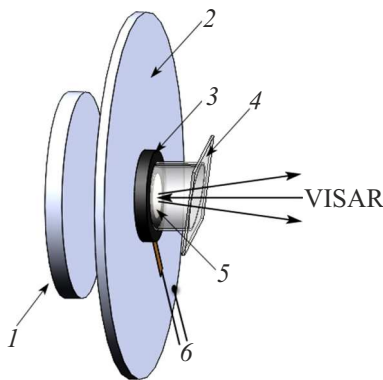


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — ударник, 2 — экран, 3 — образец, 4 — водяное окно, 5 — алюминиевая фольга, 6 — поляризационный датчик.

волны в исследуемых образцах 3 формировались при соударении алюминиевого ударника 1 диаметром 90 мм, разогнанного продуктами взрыва до скорости W_i , с экраном 2. Интерферометром VISAR [33] измерялась скорость движения границы образца с водой 4. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги 5 толщиной 7 μm , наклеенной на образец. Для определения абсолютного значения скорости отраженное излучение регистрировалось одновременно двумя интерферометрами с различными эталонами оптической линии задержки. В каждом опыте поляризационным датчиком 6 фиксировался момент входа ударной волны в образец, что, с использованием интерферометрических данных, позволяло определить значение волновой скорости D с погрешностью не более $\pm 0.5\%$.

Для определения откольной прочности и динамического предела упругости УУКМ 1-D разгон ударников из ПММА или алюминия толщиной 2 мм в диапазоне скоростей 190–350 м/с осуществлялся газовой пушкой калибром 50 мм. Скорость и перекоз ударников регистрировались электроконтактными датчиками. Ствол пушки и пространство вокруг образца перед экспериментом вакуумировались. Для получения более высоких давлений алюминиевые ударники толщиной 3.3 и 7 мм разгонялись до скоростей (650 ± 30) м/с и (1100 ± 50) м/с соответственно с помощью взрывных устройств.

2. Структура фронта ударных волн

Параметры экспериментальныхборок и результаты экспериментов по исследованию структуры фронта при различной ориентации волокон относительно направления распространения ударных волн приведены в табл. 1 и на рис. 3. В таблице указаны скорость алюминиевого ударника W_i , его толщина h_i , материал и толщина экрана h_b и толщина образца h_s . Обозначения профилей скорости, приведенных на рис. 3, совпадают с нумераци-

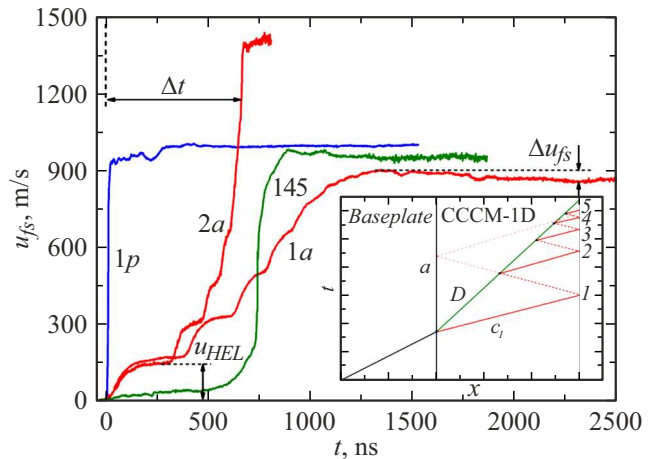


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности образцов УУКМ 1-D при продольной (1a, 2a) и поперечной (1p) ориентациях волокон, а также под углом 45° (145). У профилей указаны номера экспериментов согласно табл. 1.

Таблица 1. Параметры ударного нагружения образцов при определении структуры фронта

№ эксперимента	Скорость ударника, W_i , м/с	Толщина ударника, h_i , мм	Толщина экрана, h_b , мм	Толщина образца, h_s , мм
Нагружение вдоль волокон				
1a	650 ± 20	3.37	3.37	3.00
2a	1100 ± 30	7.00	7.00	3.00
Нагружение перпендикулярно волокнам				
1p	650 ± 20	3.30	3.30	3.01
Нагружение под 45° к волокнам				
145	650 ± 20	3.30	2.00	2.98

ей экспериментов в табл. 1. Водяное окно в этих опытах отсутствовало.

При нагружении УУКМ 1-D перпендикулярно направлению волокон (зависимость 1p на рис. 3) на профиле $u_{fs}(t)$ регистрируется выход на поверхность образца только одиночной волны. Признаков формирования двухволновой конфигурации не наблюдается, так как скорость волны в этом эксперименте значительно превышает измеренную c_l . После достижения максимального значения скорость свободной поверхности остается постоянной в течение всего времени регистрации. Наблюдаемая непосредственно за фронтом ударной волны особенность до момента времени ~ 300 нс связана с неоднородностями микроструктуры образца.

При нагружении УУКМ 1-D вдоль волокон (зависимости 1a, 2a на рис. 3) в исследуемом образце формиру-

ется двухволновая конфигурация, которую по аналогии с металлами часто называют упругопластической. Взаимодействие упругопластической волны сжатия со свободной поверхностью образца приводит к появлению отражений и искажению регистрируемого волнового профиля [34,35]. Возникающие волновые взаимодействия, соответствующие опыту 1а, представлены на диаграмме время t — координата x на вставке в рис. 3. Траектория распространения пластической волны обозначена как D , красным цветом указаны характеристики, вдоль которых распространяются звуковые волны c_l . Приведены только те характеристики, которые используются при дальнейшем обсуждении результатов. Первая волна (упругая), распространяющаяся с продольной скоростью звука c_l , после выхода на свободную поверхность (соответствующий момент времени обозначен цифрой на вставке в рис. 3) отражается волной разрежения. После встречи отраженной волны с пластической ударной волной в разгруженном материале вновь формируется упругая волна сжатия, что можно рассматривать как отражение упругой волны разрежения от пластической волны сжатия. Это отражение формирует вторую ступеньку на профиле скорости свободной поверхности (точка 2). В результате многократных переотражений наблюдается „ступенчатый“ рост скорости свободной поверхности (точки 1–5). Поскольку продольная скорость звука c_l вдоль волокон составляет 11.44 км/с, двухволновая конфигурация будет наблюдаться в широком диапазоне давлений, пока скорость пластической волны не превысит c_l .

На рис. 3 представлен также профиль скорости свободной поверхности УУКМ 1-D при ударном нагружении образца под углом 45° к направлению волокон (эксперимент №145). В этом случае, как и при ориентации 0° , фиксируется выход на свободную поверхность упругой и пластической волн. Однако при нагружении под углом 45° упругая волна размыта, и ступенчатый характер увеличения скорости отчетливо не наблюдается. Кроме того, амплитуда предвестника значительно меньше, чем в опыте 1а.

Измеренная из волнового профиля амплитуда упругой волны сжатия u_{HEL} позволяет рассчитать упругий предел Гюгоню $\sigma_{HEL} = 1/2 \cdot \rho_0 \cdot c_l \cdot u_{HEL}$, связанный с динамическим пределом упругости материала [36]. Величина σ_{HEL} УУКМ 1-D при продольной ориентации волокон меняется от эксперимента к эксперименту и составила в опыте 1а 1.78 ГПа, в опыте 2а — 1.54 ГПа. Данное различие не связано с влиянием максимального напряжения сжатия на величину σ_{HEL} , а обусловлено гетерогенной структурой образцов. При ориентации 45° значение $u_{HEL} = 41$ м/с, взятое на профиле $u_{fs}(t)$, является оценочным, а соответствующая ему величина динамического предела упругости равна 0.30 ГПа.

3. Ударная сжимаемость углерод-углеродного композита

Параметры экспериментальныхборок и результаты экспериментов по исследованию ударно-волновой сжимаемости однонаправленного углерод-углеродного композита приведены в табл. 2 и на рис. 4–7. В данном случае в отличие от опытов, результаты которых приведены на рис. 3, профили скорости измерялись на контактной границе образец/вода. Обозначения в табл. 2 аналогичны обозначениям в табл. 1, кроме того, там представлены измеренная скорость ударной волны D , давление P и массовая скорость u . Давление и массовая скорость были рассчитаны по измеренным значениям W_i , D , и известным ударным адиабатам экрана и ударника в результате анализа течения в плоскости P - u [32]. Обозначения профилей скорости, приведенных на рис. 4–7, совпадают с нумерацией экспериментов в табл. 2.

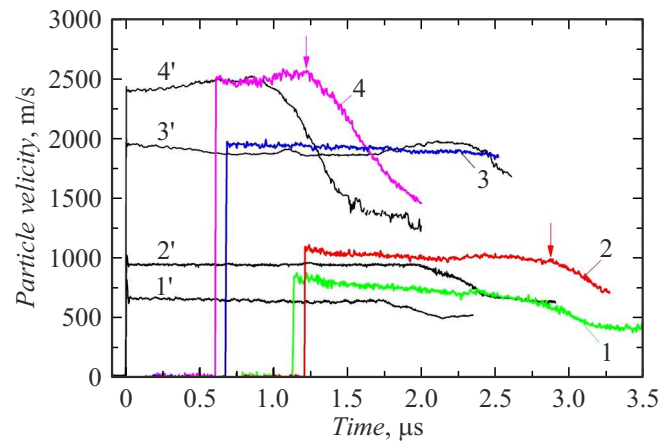


Рис. 4. Профили массовой скорости на границе образец/вода при поперечной ориентации волокон при давлении ударного сжатия ниже 30 ГПа. Нумерация профилей соответствует табл. 2.

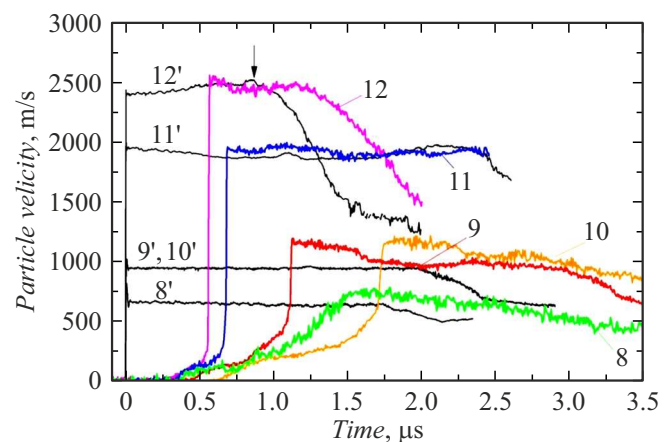


Рис. 5. Профили массовой скорости на границе образец/вода при продольной ориентации волокон при давлении ударного сжатия ниже 30 ГПа. Нумерация профилей соответствует табл. 2.

Таблица 2. Параметры и результаты экспериментов при определении ударной адиабаты однонаправленного углерод-углеродного композита при продольной и поперечной ориентации волокон, а также под углом 45° относительно направления удара

№ эксперимента	Скорость ударника, W_i , km/s	Толщина ударника, h_i , mm	Толщина экрана, h_b , mm	Толщина образца, h_s , mm	Скорость ударной волны, D , km/s	Массовая скорость, u , km/s	Давление, P , GPa
Нагружение перпендикулярно волокнам							
1	1.13	7	Cu, 5.5	3.39	2.99 ± 0.05	0.59 ± 0.02	3.24 ± 0.05
2	1.13	7	Al, 4.0	4.47	3.72 ± 0.05	0.79 ± 0.02	5.40 ± 0.05
3	2.50	10	Al, 4.0	3.40	4.97 ± 0.05	1.64 ± 0.02	14.96 ± 0.05
4	3.30	5	Al, 2.0	3.40	5.69 ± 0.05	2.11 ± 0.02	22.04 ± 0.05
5	5.05	2	Cu, 2.0	3.00	6.50 ± 0.05	2.54 ± 0.02	30.31 ± 0.05
6	4.60	2	Al, 2.0	2.44	6.80 ± 0.05	2.86 ± 0.02	35.71 ± 0.05
7	5.05	2	Al, 2.0	2.58	7.08 ± 0.05	3.14 ± 0.02	40.82 ± 0.05
Нагружение вдоль волокон							
8	1.13	7	Cu, 5.5	3.40	2.57 ± 0.05	0.57 ± 0.02	4.65 ± 0.05
9	1.13	7	Al, 4.0	3.43	3.07 ± 0.05	0.76 ± 0.02	5.50 ± 0.05
10	1.13	7	Al, 4.0	5.47	3.07 ± 0.05	0.76 ± 0.02	5.50 ± 0.05
11	2.50	10	Al, 4.0	3.42	5.02 ± 0.05	1.64 ± 0.02	15.12 ± 0.05
12	3.30	5	Al, 2.0	3.36	5.92 ± 0.05	2.09 ± 0.02	22.72 ± 0.05
13	5.05	2	Cu, 2.0	3.42	6.95 ± 0.05	2.52 ± 0.02	32.16 ± 0.05
14	4.60	2	Al, 2.0	3.43	7.52 ± 0.05	2.77 ± 0.02	38.24 ± 0.05
15	5.05	2	Al, 2.0	3.42	7.77 ± 0.05	3.04 ± 0.02	43.37 ± 0.05
Нагружение под 45° к направлению волокон							
16	1.13	7	Al, 4.0	3.47	3.62 ± 0.05	0.79 ± 0.02	5.58 ± 0.05
17	2.50	10	Al, 4.0	3.19	5.45 ± 0.05	1.60 ± 0.02	16.01 ± 0.05
18	5.05	2	Al, 2.0	3.31	8.07 ± 0.05	3.00 ± 0.02	44.45 ± 0.05

На рис. 4–7, наряду с профилями скорости на границе образец/вода, приведены также профили скорости, которые измерялись в отдельных экспериментах на границе экрана с водой при отсутствии образца. Они позволяют определить амплитуды и длительности ударных волн, входящих в образцы. Цифровые обозначения 1'–18' соответствуют входящим волновым профилям в опытах 1–18.

Используемые в экспериментах ударники формируют импульсы сжатия, в которых после ударного скачка скорость остается приблизительно постоянной в течение времени от 0.3 до 2 мкс, которое определяется приходом тыльной разгрузки со стороны ударника. По мере распространения по образцу, это время сокращается, но, поскольку толщина образцов небольшая, во всех опытах к моменту выхода волны на границу с водой область постоянных значений параметров сохраняется до прихода волны разрежения со стороны ударника. На

рис. 4, 5 это время для нескольких профилей отмечено вертикальными стрелками. Поскольку на полученных профилях начало спада скорости не всегда выражено отчетливо, положение стрелок определяется с погрешностью ± 10 ns. В некоторых опытах (например, №3) регистрация скорости прекращается раньше прихода волны разрежения.

Наиболее яркой отличительной особенностью профилей скорости при продольной ориентации волокон, как и при регистрации скорости свободной поверхности (рис. 3), является наличие двухволновой конфигурации (рис. 5, 6). Наличие водяного окна приводит к сглаживанию ступенчатого характера роста скорости, обусловленного циркуляцией предвестника между границей образец/вода и фронтом пластической волны, распространяющейся со скоростью D . Во всех проведенных экспериментах величина D не превышала 8 км/с, поэтому двухволновая конфигурация при продольной

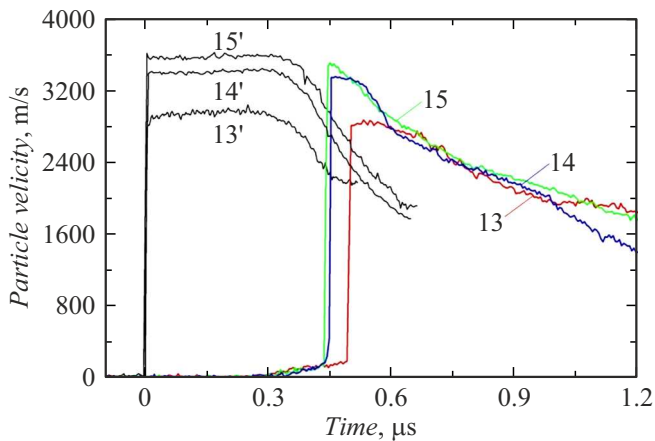


Рис. 6. Профили массовой скорости на границе образец/вода при продольной ориентации волокон при давлении ударного сжатия выше 30 GPa. Нумерация профилей соответствует табл. 2.

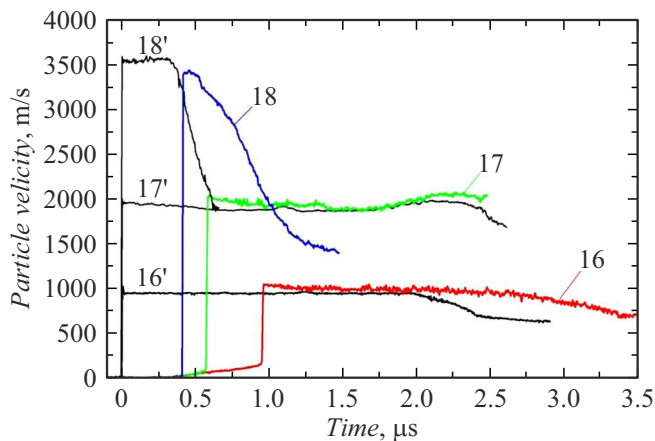


Рис. 7. Профили массовой скорости на границе образец/вода при ориентации волокон под углом 45°. Нумерация профилей соответствует табл. 2.

ориентации волокон наблюдается во всем измеренном интервале давлений ударного сжатия до 40 GPa.

Характер эволюции двухволновой конфигурации наглядно демонстрирует сопоставление опытов №9 и №10 (рис. 5), которые проведены в одинаковой постановке, изменялась лишь толщина образца от 3.43 mm в опыте 9 до 5.47 mm в опыте 10. Расхождение между фронтом второй волны и предвестником увеличивается по мере распространения их по образцу. При этом скорость каждой из волн остается постоянной.

Профили скорости при ориентации волокон 45° приведены на рис. 7. В данном случае, как и при продольной ориентации волокон, регистрируется двухволновая структура: сначала на границу с водой выходит предвестник, а затем вторая ударная волна. Как уже отмечалось при обсуждении рис. 3, имеющиеся различия носят количественный характер, например, уменьша-

ется амплитуда предвестника. Результатом снижения продольной скорости звука ($c_l = 7.98 \text{ km/s}$) является исчезновение двухволновой конфигурации в опыте №18, в котором скорость ударной волны D равна 8.07 km/s , что превышает c_l .

Как уже отмечалось, во всех экспериментах измерялась скорость ударной волны D . Поскольку скорость ударника, а также ударные адиабаты ударника и экрана известны, это позволяет определить массовую скорость u в исследуемом образце. В результате обработки экспериментальных данных построены ударные адиабаты однонаправленного углерод-углеродного композита при поперечной, продольной и при 45° ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны (рис. 8). Из сопоставления ударных адиабат при различной ориентации волокон видно, что сжимаемость образца зависит от направления распространения ударной волны: ударные адиабаты в плоскости $D-u$ имеют различный наклон, и для поперечной и продольной ориентации пересекаются при $u \approx 1.6 \text{ km/s}$. Второй особенностью является наличие отчетливо выраженного излома на зависимостях $D(u)$ в окрестности $u = 2.5-2.8 \text{ km/s}$, который обусловлен фазовым переходом графит/алмаз. Эти изломы на ударных адиабатах отмечены вертикальными стрелками (рис. 8), и их положение зависит от ориентации волокон относительно направления распространения ударных волн. Полученный результат согласуется с данными авторов [37,38], которые показали, что условия и кинетика фазового перехода углерод/алмаз при ударно-волновом нагружении чрезвычайно чувствительны к конкретной структуре исходных графитовых образцов.

На рис. 8 видно, что при заданной ориентации волокон в исследованном диапазоне давлений экспериментальные данные не аппроксимируются единой линейной зависимостью. При поперечной ориентации воло-

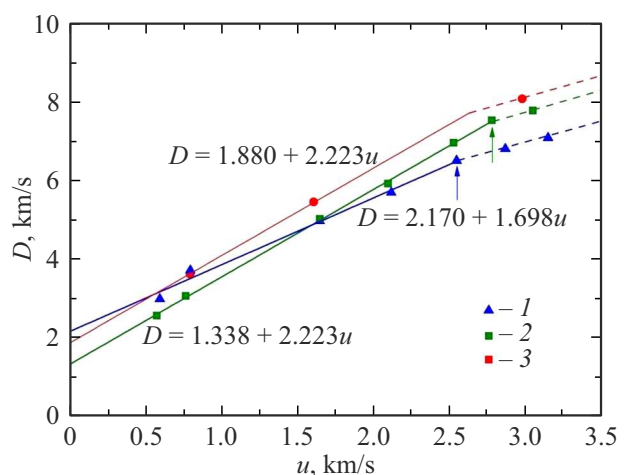


Рис. 8. Ударные адиабаты однонаправленного углерод-углеродного композита при поперечной (1), продольной (2) и под углом 45° (3) ориентации волокон. Линии — линейная аппроксимация экспериментальных данных.

кон $D = 2.17 + 1.7 \cdot u$ при $u < 2.5$ km/s; при продольной — $D = 1.34 + 2.22 \cdot u$, при $u < 2.8$ km/s и при 45° $D = 1.88 + 2.22 \cdot u$ при $u < 2.6$ km/s.

На ударной адиабате композита УУКМ 1-D при ориентации волокон 45° получено всего три точки. Поэтому при аппроксимации ударной адиабаты предполагалось, что фазовый переход происходит в том же интервале давлений, что и для двух других ориентаций — примерно при $u = 2.6$ km/s. При этом две точки ниже фазового перехода с хорошей точностью лежат на прямой, параллельной ударной адиабате для продольной ориентации волокон (рис. 8).

Полученная выше структура волновых профилей для углерод-углеродного композита УУКМ 1-D рассматривалась в рамках упругопластической модели, что позволяет объяснить основные закономерности течения, реализующегося при ударно-волновом нагружении. Следует, однако, отметить, что некоторые особенности, регистрируемые на профилях скорости, не согласуются с этим предположением. Например, в экспериментах 9 и 10, результаты которых представлены в табл. 2 и на рис. 5, за фронтом пластической волны скорость остается практически постоянной в течение $\sim 0.5 \mu\text{s}$, а затем резко уменьшается примерно на 100 m/s. Ничего подобного в опыте 2 (табл. 2 и рис. 4), проведенном в той же постановке при поперечной ориентации волокон, не наблюдается. Появление этой особенности обусловлено упругой волной разрежения, которая сформировалась после отражения предвестника от границы образец/вода. Эта волна после встречи с пластическим фронтом распространяется по образцу в сторону экрана волной разрежения, что показано на вставке в рис. 3 тонкой штриховой линией. После отражения от экрана она возвращается на границу с окном, вызывая спад скорости. Если предположить, как это сделано на вставке в рис. 3, что за фронтом пластической ударной волны исследуемая среда сохраняет упругие свойства, то отраженная от экрана волна должна выйти на границу с окном в опытах 9 и 10 раньше фронта пластической волны. Причем аналогичная ситуация должна реализовываться и в опыте 1а. Однако никаких особенностей перед пластическим фронтом в этих опытах не наблюдается. Более того, если за фронтом пластической волны образец сохраняет упругие свойства, то отраженная от экрана волна будет волной сжатия, поскольку в области упругости динамический импеданс УУКМ 1-D выше, чем у алюминиевого экрана. Поэтому при выходе этой волны на границу с окном должно наблюдаться не уменьшение, а увеличение скорости.

Эти несоответствия полученным экспериментальным данным устраняются, если считать, что за фронтом второй (пластической) ударной волны углерод-углеродного композит УУКМ 1-D теряет упругие свойства. Во-первых, в этом случае импеданс УУКМ 1-D в области пластической деформации ниже, чем у алюминия, поэтому отраженная от экрана волна будет волной разрежения, и в момент ее выхода на границу с окном

скорость границы уменьшится. Во-вторых, увеличится время циркуляции этой волны по образцу, поскольку в области пластической деформации она будет распространяться со скоростью, меньшей продольной скорости звука c_l . Соответствующее значение лагранжевой скорости звука C_L за фронтом пластической волны может быть получено из анализа волновых профилей 9 и 10 (рис. 5) и равно ~ 5.5 km/s, что значительно меньше c_l .

Таким образом, при анализе ударно-волновых взаимодействий необходимо учитывать, что исследуемые образцы могут не сохранять упругие свойства за второй (пластической) волной сжатия.

4. Откольная прочность УУКМ 1-D

Динамическая прочность углерод-углеродного композита УУКМ 1-D исследовалась путем анализа откольных явлений при отражении импульса сжатия от свободной поверхности среды, при котором волна сжатия превращается в волну растяжения [36]. Экспериментальные исследования [36,39,40] показывают, что в зоне растягивающих напряжений происходит зарождение большого числа микротрещин, которые в своем дальнейшем развитии сливаются в единую магистральную трещину, разделяющую образец на две части, с формированием откольной пластины. Параметры экспериментальных сборок и результаты экспериментов приведены в табл. 3. В табл. 3 представлены результаты всех экспериментов, в которых регистрировалась скорость свободной поверхности, в том числе и указанные в табл. 1. Наряду с введенными ранее обозначениями в табл. 3 добавлены σ_{HEL} — динамический предел упругости, σ_{sp} — откольная прочность или максимальные растягивающие напряжения в упругой области деформирования и \dot{V}/V_0 — скорость деформирования в волне разрежения перед разрушением.

Растягивающие напряжения внутри образца возникают в результате взаимодействия отраженной от свободной поверхности волны разрежения с падающей волной разрежения, распространяющейся вглубь образца с тыльной стороны ударника. На рис. 3 такие условия реализуются только в эксперименте 1а, в котором после достижения максимальной скорости регистрируется спад последней, связанный с выходом на свободную поверхность волны разгрузки, приходящей с тыльной поверхности ударника. Взаимодействие последней с отраженной пластической волной от свободной поверхности УУКМ 1-D в виде волны разрежения приводят к откольному разрушению. Величина спада скорости поверхности Δu_{fs} (рис. 3) от ее максимума до первого минимума перед фронтом откольного импульса пропорциональна откольной прочности материала σ_{sp} . В линейном приближении величина откольной прочности определяется как $\sigma_{sp} = 1/2 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot \Delta u_{fs}$ [41], где c_0 — объемная скорость звука, принимающая значение c_b из

Таблица 3. Постановка и результаты экспериментов с УУКМ 1-D

№ эксперимента	Скорость ударника, W_i , m/s	Толщина ударника, h_i , mm	Толщина экрана, h_b , mm	Толщина образца, h_s , mm	Предел упругости, σ_{HEL} , GPa	Откольная прочность, σ_{sp} , GPa	Скорость деформации, \dot{V}/V_0 , s ⁻¹
Нагружение вдоль направления волокон							
1a	650	Al, 3.37	Al, 2.00	3.00	1.78	0.055	$1.94 \cdot 10^4$
2a	1100	Al, 7.00	Al, 2.00	3.00	1.54	–	–
3a	350	Al, 1.998	–	3.04	1.65	> 0.33	$1.12 \cdot 10^4$
4a	350	Al, 0.94	–	3.05	1.76	> 0.33	$2.31 \cdot 10^4$
5a	350	Al, 0.462	–	3.03	1.68	> 0.94	$3.91 \cdot 10^4$
6a	190	Al, 0.735	–	2.97	–	1.32	$1.62 \cdot 10^5$
Перпендикулярно направлению волокон							
1p	650	Al, 3.30	Al, 2.00	3.01	0.01–0.015	–	–
2p	350	PMMA 1.258	–	2.96	0.01–0.015	0.110	$3.91 \cdot 10^5$
3p	190	PMMA 0.961	–	3.06	0.01–0.015	0.036	$0.67 \cdot 10^4$
4p	350	PMMA 0.965	–	3.04	0.01–0.015	0.036	$0.82 \cdot 10^4$
Нагружение под 45° к направлению волокон							
145	650	Al, 3.30	Al, 2.00	2.98	0.30	0.063	$1.79 \cdot 10^4$
245	250	Al, 3.00	–	3.07	0.63	0.071	$1.62 \cdot 10^4$

измеренной зависимости $D = c_b + b \cdot u_p$. При нагружении вдоль волокон $c_b = 1.338$ km/s, $\sigma_{sp} = 55$ МПа.

На рис. 9 показаны профили скорости свободной поверхности образцов УУКМ 1-D толщиной 3 mm при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной 2, 0.94 и 0.46 mm со скоростью 350 m/s вдоль волокон. Во всех трех экспериментах регистрируется выход упругой волны на свободную поверхность. По измеренной амплитуде упругой волны u_{HEL} рассчитывался динамический предел упругости УУКМ 1-D σ_{HEL} , полученные данные представлены в табл. 3 и согласуются с высокоскоростными экспериментами 1a и 2a. Целью проведения экспериментов 3a, 4a и 5a является измерение откольной прочности на различных этапах циркуляции упругой волны между фронтом пластической волны и свободной поверхностью. На вставке рис. 9 показана $t-x$ диаграмма волновых взаимодействий, реализованных в эксперименте 4a. Траектория распространения пластической волны обозначена как D , красным цветом указаны характеристики, вдоль которых распространяются звуковые волны c_l . Синим цветом обозначена центрированная волна разрежения, распространяющаяся от тыльной поверхности ударника. В отличие от эксперимента 3a, в котором был достаточно толстый ударник, в эксперименте 4a разгрузка от ударника толщиной 0.94 mm приходит гораздо раньше. При этом упругая волна разгрузки успевает отразиться от пластической

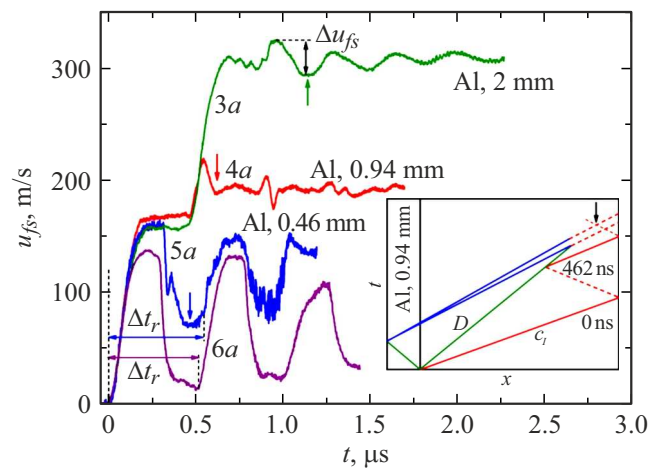


Рис. 9. Профили скорости свободной поверхности образцов УУКМ 1-D при нагружении алюминиевыми ударниками различной толщины со скоростью 350 m/s вдоль волокон (3a–5a) и эксперимент (6a), в котором максимальное напряжение сжатия не превышало σ_{HEL} . У профилей указаны толщины ударников, моменты времени реализации максимальных растягивающих напряжений и номера экспериментов согласно табл. 3. На вставке показана $t-x$ диаграмма волновых взаимодействий в эксперименте 4a.

один раз и выйти на свободную поверхность в виде упругой волны сжатия в момент времени 462 ns. При

взаимодействии волны разгрузки, распространяющейся со стороны ударника, и отраженной упругой волной от свободной поверхности возникают растягивающие напряжения в области, отмеченной на вставке вертикальной стрелкой. Аналогичная ситуация возникает и в эксперименте 3а, в котором предвестник успевает отразиться два раза. В обоих случаях реализуется разрушение, приводящее, в частности, к характерным осцилляциям скорости в откольной пластине. Перепад скорости Δu_{fs} между максимальным ее значением и значением перед откольным импульсом в этих двух опытах составляет 31 м/с.

В эксперименте 5а с ударником толщиной 0.46 мм волна разгрузки догоняет пластическую волну, которая полностью затухает, и на свободную поверхность выходит упругая волна. В результате взаимодействия двух встречных упругих волн разгрузки и возникли растягивающие напряжения. Амплитуда упругой волны разгрузки Δu_{fs} , регистрируемая на свободной поверхности, составила 89 м/с. Подтверждением взаимодействия упругих волн в эксперименте 5а является тот факт, что выход второго переотраженного импульса произошел через 523 нс. Скорость распространения волны в упругой области определяется по выходу второго переотраженного импульса как $2h_s/\Delta t_r = 11.56$ км/с, что незначительно превышает измеренную c_l .

Если считать, что все волновые взаимодействия в экспериментах 3а, 4а и 5а происходят в упругой области, то расчет максимальных напряжений сжатия и растяжения следует производить с помощью соотношения $\sigma_{sp} = 1/2 \cdot \rho_0 \cdot c_l \cdot \Delta u_{fs}$. В экспериментах 3а и 4а максимальные растягивающие напряжения составили 0.33 ГПа, в эксперименте 5а — 0.94 ГПа. Столь значительное различие σ_{sp} свидетельствует о том, что разрушение образцов УУКМ 1-D происходит не в упругой области и обусловлено, вероятно, следующими обстоятельствами. Затухание амплитуды пластической волны из-за разгрузки со стороны ударника происходит в этих опытах раньше ее выхода на свободную поверхность. Поэтому часть образца, прилегающая к свободной поверхности, не подвергается пластической деформации, сохраняет упругие свойства и способна выдержать высокие растягивающие напряжения. Но в области, подвергнувшейся пластической деформации, откольная прочность, как это следует из результатов опыта 1а, очень мала. Поэтому, как только растягивающие напряжения на границе этих двух областей превысят это значение, произойдет разрушение. При этом в упругой части образца реализуются значительно более высокие напряжения, которые зависят от конкретных условий проведения эксперимента и позволяют получить только нижнюю оценку величины откольной прочности в области упругости.

Для определения откольной прочности образцов УУКМ 1-D в области упругости был проведен опыт 6а (профиль 6а на рис. 9), в котором максимальное напряжение сжатия составило 1.47 ГПа, т. е. не превышало

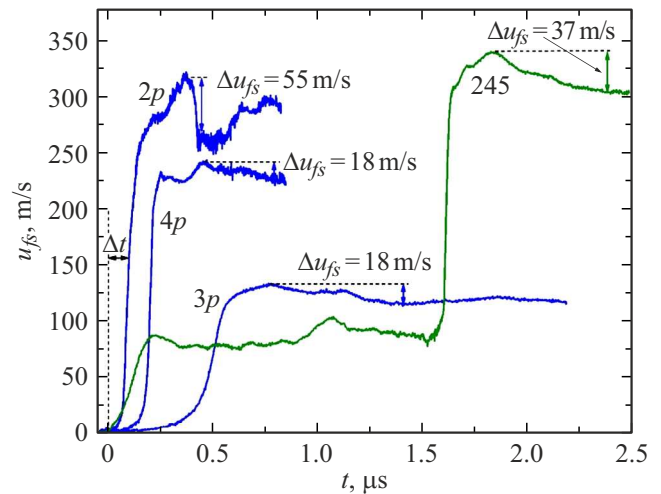


Рис. 10. Профили скорости свободной поверхности образцов УУКМ 1-D при ударном нагружении перпендикулярно и под углом 45° к направлению волокон. У профилей указаны номера экспериментов согласно табл. 3.

σ_{HEL} . В этом эксперименте откольного разрушения не произошло, максимальное растягивающее напряжение составило 1.32 ГПа. Расчет скорости упругой волны по выходу второго переотраженного импульса показал, что $2h_s/\Delta t_r = 11.647$ км/с. Измеренная с помощью контактных датчиков скорость упругой волны U_{el} в этом эксперименте составила 11.627 км/с. Оба значения практически равны и незначительно превышают измеренную c_l в комнатных условиях.

На рис. 10 показаны профили скорости свободной поверхности образцов УУКМ 1-D толщиной 3 мм при ударном нагружении перпендикулярно направлению волокон. В экспериментах 3р и 4р с помощью контактных датчиков измерялась скорость упругой волны U_{el} . Результаты измерений скорости упругой волны U_{el} равны или близки к измеренной c_l при нормальном давлении. На профилях u_{fs} видна существенная разница в поведении УУКМ 1-D в зависимости от направления нагружения. Если при нагружении вдоль волокон наблюдается ступенчатый рост скорости свободной поверхности из-за отражения предвестника от пластической волны, то при нагружении перпендикулярно волокнам регистрируется монотонный рост скорости с формированием отчетливо выраженного фронта ударной волны. При достижении максимальной скорости и в разгрузке на профилях 2р–4р фиксируются невоспроизводимые особенности, связанные с микроструктурой образца. Форма упругой волны при нагружении перпендикулярно волокнам не позволяет рассчитать точную величину σ_{HEL} . В средней части упругой волны экспериментов 2р–4р ее амплитуда составляет 8–9 м/с, что соответствует $\sigma_{HEL} \sim 14$ МПа, это на два порядка ниже, чем при ударном нагружении вдоль волокон. Из-за низкой скорости c_l в направлении перпендикулярно волокнам

регистрируется значительное уменьшение времени Δt между выходом упругой и пластической волн с ростом максимального напряжения сжатия. В эксперименте $1p$ на рис. 3 скорость ударной волны превысила значение c_l , вследствие чего упругопластический переход не фиксируется. Расчет скорости пластической волны D по времени Δt выхода пластической волны показал, что в эксперименте $3p$ $D = 1.45$ km/s, в $4p$ — $D = 1.69$ km/s и в $2p$ — $D = 1.79$ km/s. С ростом максимального напряжения сжатия в экспериментах $2p$ – $4p$ наблюдается рост скорости деформирования в пластической волне. Временное разрешение интерферометра позволяет измерить время роста скорости в пластической волне и оценить скорость деформирования с помощью соотношения $\dot{\epsilon} = \dot{u}_{fs}/2D$, где \dot{u}_{fs} — скорость роста скорости свободной поверхности в пластической волне. Скорость деформирования в пластической волне растет с $3.1 \cdot 10^5$ s $^{-1}$ в эксперименте $3p$ до $\sim 1.6 \cdot 10^6$ s $^{-1}$ в экспериментах $2p$ и $4p$.

На профилях скорости свободной поверхности $2p$ – $4p$ (рис. 10) фиксируется откольное разрушение, которое проявляется в виде минимума в разгрузочной части импульса. Перепад скорости, обозначенный на рисунке как Δu_{fs} , позволяет определить величину откольной прочности [36]. Так как разрушение происходит в пластической области, для расчета откольной прочности используем соотношение $\sigma_{sp} = 1/2 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot \Delta u_{fs}$. Значение объемной скорости звука при нагружении перпендикулярно направлению волокон $c_b = 2.170$ km/s. Величина откольной прочности в экспериментах $3p$ и $4p$ составила $\sigma_{sp} = 36$ МПа, в эксперименте $2p$ — $\sigma_{sp} = 110$ МПа. В данном случае откольная прочность не зависит от максимального напряжения сжатия, а зависит от микроструктуры, т. е. от сечения, где произошел откол, внутри волокна или между волокон. Скорость деформации материала перед отколом фактически является скоростью расширения вещества в волне разрежения и равна

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{fsr}}{2c_b},$$

где \dot{u}_{fsr} — скорость спада скорости свободной поверхности в волне разгрузки перед отколом, определяемая из волнового профиля. В табл. 3 суммированы полученные значения скоростей деформирования в волне разрежения для экспериментов вдоль и перпендикулярно направлению волокон, а также под углом 45° в пластической области деформирования.

На рис. 11 суммированы полученные значения откольной прочности УУКМ 1-D от скорости деформирования для исследованных ориентаций. Прозрачная красная точка соответствует откольной прочности при продольной ориентации волокон в опыте $1a$. Видно, что в области пластического деформирования (сплошные синие и зеленые точки, а также красная прозрачная точка) при скоростях деформации $\sim 10^4$ s $^{-1}$ значения откольной прочности для исследованных ориентаций

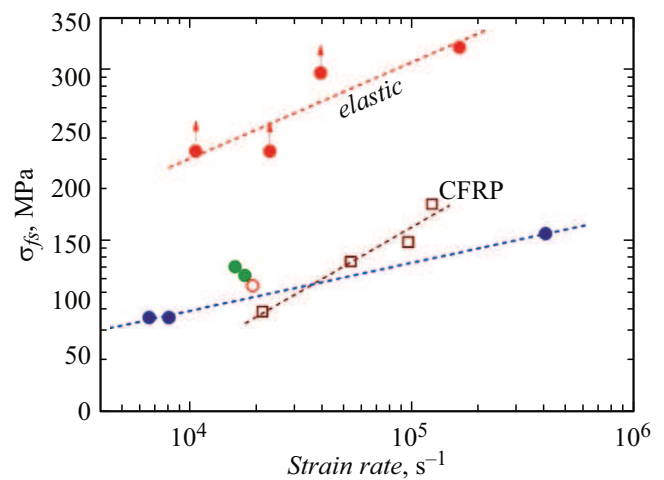


Рис. 11. Зависимость откольной прочности от скорости деформирования УУКМ 1-D при ударном нагружении вдоль (красные точки), перпендикулярно (синие точки) и под углом 45° (зеленые точки) к направлению волокон. CFRP — экспериментальные данные из [42].

незначительно отличаются друг от друга и находятся в области 35–70 МПа. В перпендикулярном направлении регистрируется двукратный рост откольной прочности от увеличения скорости деформирования на порядок. На рис. 11 приведены также результаты исследования откольной прочности углепластика CFRP из работы [11], которые количественно достаточно хорошо согласуются с полученными данными. В то же время следует отметить, что зависимости откольной прочности от скорости деформации не совпадают, а пересекаются, что является одним из проявлений различного влияния углеродной (УУКМ 1-D) и полимерной (CFRP) матриц на откольную прочность композитов. При нагружении вдоль волокон разрушение происходит на границе между областями упругой и пластической деформации. Поскольку в упругой области образец не разрушается, приведенные на рис. 11 точки со стрелками характеризуют не откольную прочность, а максимальные растягивающие напряжения, которые были реализованы в области упругости в конкретном опыте. Соответствующие величины на порядок выше откольной прочности в пластической области. Подобное поведение характерно для монокристаллического сапфира, в котором регистрируются чрезвычайно высокие значения откольной прочности в упругой области, и с переходом в область пластического течения прочность либо становится нулевой, либо незначительной. Подобное поведение характерно для некоторых керамик [36].

Заключение

Определена структура фронта ударной волны и ударная сжимаемость однонаправленного углерод-углеродного композиционного материала УУКМ 1-D

при распространении ударных волн под углами 0, 45 и 90° относительно ориентации волокон. При нагружении образца вдоль волокон зарегистрирована двухволновая конфигурация, которая наблюдается во всем исследованном диапазоне давлений до 40 ГПа. Аналогичная структура фронта наблюдается и при ориентации волокон под углом 45°, но из-за меньшего значения c_l двухволновая конфигурация исчезает раньше, чем при 0°, так как скорость распространения первой волны определяется скоростью звука, измеренной вдоль волокон. Показано, что ударная адиабата композита зависит от направления ударно-волнового воздействия. В окрестности давления ударного сжатия 30 ГПа на ударной адиабате зарегистрирован излом, свидетельствующий о фазовом переходе в углероде при этом давлении ударного сжатия.

На основе регистрации и последующего анализа волновых профилей проведены измерения откольной прочности однонаправленного углерод-углеродного композиционного материала УУКМ 1-D при ударном нагружении образцов под углами 0, 45 и 90° относительно ориентации волокон. Показано, что исследованный композит не разрушается в области упругой деформации, т.е. величина откольной прочности определяется его динамическим пределом упругости и превышает 1 ГПа. При пластической деформации образец УУКМ 1-D теряет упругие свойства, и откольная прочность уменьшается на порядок независимо от ориентации волокон. При этом наблюдается сильная зависимость σ_{sp} от скорости деформации, увеличение которой на порядок приводит к двукратному росту откольной прочности.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по программе „Комплексное исследование физико-химических свойств и процессов в веществе в условиях высокоэнергетических воздействий“, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, № темы FFSG-2024-0001, регистрационный № 124020600049-8 с использованием оборудования ЦКП „Перспективные взрывные технологии“, а также УНУ (уникальная научная установка) „Экспериментальный взрывной стенд“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] 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
- [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] I. Taraghi, A. Fereidoon, F. Taheri-Behrooz. *Mater. Des.*, **53**, 152 (2014). DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.051
- [4] E. Zaretsky, G. DeBotton, M. Perl. *Int. J. Solids Struct.*, **41**, 569 (2004). DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.09.026
- [5] D.M. Dattelbaum, J.D. Coe. *The dynamic loading response of carbon-fiber-filled polymer composites*. In V.V. Silberschmidt (editor). *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures* (Woodhead Publishing, 2016), p. 225–277. DOI: 10.1016/B978-0-08-100080-9.00009-9
- [6] P.-L. Hereil, O. Allix, M. Gratton. *J. Phys.*, **IV** (7), C3 (1997). DOI: 10.1051/jp4:1997391
- [7] 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
- [8] V. Mochalova, A. Utkin, A. Savinykh, G. Garkushin. *Compos. Struct.*, **273**, 114309 (2021). DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114309
- [9] S.A. Bordzilovskii, S.M. Karakhanov, L.A. Merzhievskii. *Combust. Explos. Shock Waves*, **33**, 354 (1997). DOI: 10.1007/BF02671876
- [10] 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
- [11] 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
- [12] N. Agarwal, A. Rangamani, K. Bhavsar, S.S. Virnodkar, A.A.A. Fernandes, U. Chadha, D. Srivastava, A.E. Patterson, V. Rajasekharan. *Front. Mater.*, **11**, 1374034 (2024).
- [13] T. Lässig, F. Bagusat, S. Pfändler, M. Gulde, D. Heunoske, J. Osterholz, W. Stein, H. Nahme, M. May. *Compos. Struct.*, **182**, 590 (2017). DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.031
- [14] B.X. Bic, J.H. Han, L. Lu, X.M. Zhou, M.L. Qi, Z. Zhang, S.N. Luo. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, **68**, 282 (2015). DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.10.001
- [15] A.V. Bushman, V.P. Efremov, V.E. Fortov, G.I. Kanel, I.V. Lomonosov, V.Y. Ternovoi, A.V. Utkin. *Shock Compression Condens. Matter*, **1991**, 79 (1992). DOI: 10.1016/B978-0-444-89732-9.50018-2
- [16] P.J. Hazell. *Dyn. Deform. Damage Fract. Compos. Mater. Struct.*, **337** (2016). DOI: 10.1016/B978-0-08-100080-9.00012-9
- [17] J. Ribeiro, I. Plaksin, J. Campos, R. Mendes, J. Gois. *Process of shock attenuation inside a hollow glass microsphere/polymeric composite media*. In: AIP Conf. Proc. (American Institute of Physics, 2000), p. 559–562, DOI: 10.1063/1.1303536
- [18] R.F. Trunin, L.F. Gudarenko, M.V. Zhernokletov, G.V. Simakov. *Experimental data on shock compression and adiabatic expansion of condensed matter* (RFNC-VNIIEF, Sarov, 446, 2001)
- [19] S. Katz, E. Zaretsky, E. Grossman, H.D. Wagner. *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 1250 (2009). DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.02.031
- [20] D.M. Dattelbaum, J.D. Coe. *Polymers*, **11**, 493 (2019). DOI: 10.3390/polym11030493
- [21] T.A. Rostilov, V.S. Ziborov. *Acta Astronaut.*, **178**, 900 (2021). DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.10.022
- [22] В.М. Мочалова, А.В. Уткин, А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, С.С. Мокрушин. *ЖТФ*, **89** (1), 126 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46973.122-18 [V.M. Mochalova, A.V. Utkin, A.V. Pavlenko, S.N. Malyugina, S.S. Mokrushin. *Tech. Phys.*, **64** (1), 100 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010225]

- [23] 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
- [24] J.C.F. Millett, N.K. Bourne, N.R. Barnes. *J. Appl. Phys.*, **92**, 6590 (2002). DOI: 10.1063/1.1506389
- [25] S.A. Bordzilovskii, S.M. Karakhanov, K.V. Khishchenko. *Explos. Shock Waves*, **49**, 121 (2013). DOI: 10.1134/S0010508213010140
- [26] C.S. Alexander, C.T. Key, S.C. Schumacher. *J. Appl. Phys.*, **114**, 223515 (2013). DOI: 10.1063/1.4846116
- [27] 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
- [28] N.K. Bourne, S. Parry, D. Townsend, P.J. Withers, C. Soutis, C. Frias. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, **374**, 20160018 (2016). DOI: 10.1098/rsta.2016.0018
- [29] S. Shah, P.J. Hazell, H. Wang, J.P. Escobedo. *Compos. Part B Eng.*, 112438 (2025).
- [30] S. Shah, P.J. Hazell, H. Wang, J.P. Escobedo. *Shock Wave Propagation in Unidirectional CFRP at Different Orientations*. In *Hypervelocity Impact Symp.* (American Society of Mechanical Engineers, 2024), p. V001T07A002, <https://asmdigitalcollection.asme.org/hvis/proceedings-abstract/HVIS2024/88728/1218760> (accessed June 30, 2025)
- [31] V. Mochalova, A. Utkin, D. Nikolaev. *J. Appl. Phys.*, **133**, 245902 (2023). DOI: 10.1063/5.0155414
- [32] V. Mochalova, A. Utkin, V. Sosikov, V. Yakushev, A. Zhukov. *Shock Waves*, **32**, 715 (2022). DOI: 10.1007/s00193-022-01104-3
- [33] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **43**, 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [34] G.I. Kanel, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. *Re-Reflections of an Elastic Precursor of a Shock Wave in Solids*. In *Dokl. Phys.* (Springer, 2021, p. 35–38), https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1134/S1028335821020038&casa_token=m67TQmSjhdMAAAAA:GhxsibO7f4jttGw2HI5VZBEKP9uxR_FcwUqUuxuuXSDX9TtPjUFYtmtgd8S0VeAYRkUVv1XgTdDyhj_Ci0I (accessed April 23, 2025).
- [35] Г.И. Канель. *Ударные волны в физике твердого тела* (Физматлит, М., 2018) <https://www.rfbr.ru/library/books/2814/> (accessed November 24, 2025).
- [36] G. Kanel, S. Razorenov, A. Utkin, V. Fortov. *Shock-Wave Phenomena in Condensed Media* (Yanus-K, M., 1996)
- [37] D.J. Erskine, W.J. Nellis. *J. Appl. Phys.*, **71**, 4882 (1992).
- [38] D.J. Erskine, W.J. Nellis. *Nature*, **349**, 317 (1991).
- [39] Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачев, А.М. Брагов. *ЖТФ*, **45** (3), 681 (1975).
- [40] Н.А. Златин, Г.С. Пугачев, С.М. Мочалов, А.М. Брагов. *ФТТ*, **17**, 2599 (1975).
- [41] С.А. Новиков, И.И. Дивнов, А.Г. Иванов. *Физика металлов и металловедение*, **21**, 608 (1966).
- [42] W. Xie, W. Zhang, L. Guo, Y. Gao, D. Li, X. Jiang. *Compos. Part B Eng.*, **153**, 176 (2018).