

УДК 534.222.2

## ИМПУЛЬСНОЕ СЖАТИЕ И РАСТЯЖЕНИЕ КОМПОЗИТОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2021 г. А. В. Уткин<sup>1, \*</sup>, В. М. Мочалова<sup>1</sup>, В. В. Якушев<sup>1</sup>, В. Е. Рыкова<sup>1</sup>,  
М. Ю. Шакула<sup>1, 2</sup>, А. В. Острик<sup>1</sup>, В. В. Ким<sup>1</sup>, И. В. Ломоносов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

\*E-mail: utkin@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

После доработки 13.11.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

С использованием лазерного интерферометра VISAR проведены исследования ударной сжимаемости и откольной прочности композитов, армированных углеродными волокнами и стекловолокном. Показано, что в обоих композитах формируется двухволновая конфигурация при распространении ударной волны вдоль волокон. В стеклопластике двухволновая конфигурация наблюдается до давления ударного сжатия 18 ГПа, тогда как в углепластике она зарегистрирована во всем исследованном диапазоне — до 33 ГПа. Определены ударные адиабаты и откольная прочность композитов при различной ориентации волокон.

DOI: 10.31857/S0040364421020137

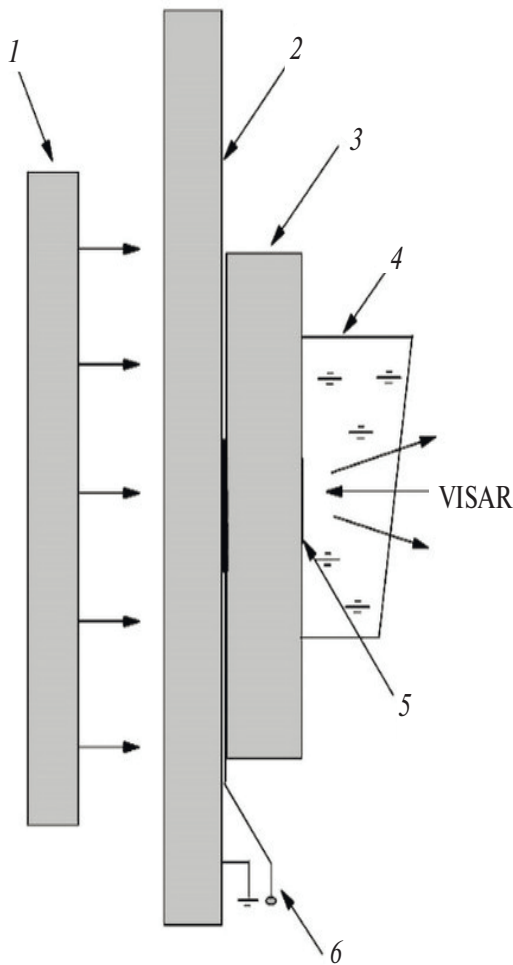
### ВВЕДЕНИЕ

Композиты на основе волокнистых материалов широко применяются в различных областях науки и техники, что связано с их высокой прочностью, жесткостью и низкой плотностью. Для прогнозирования поведения этих материалов необходимы корректные физические модели, основанные на экспериментальных данных. Неоспоримым преимуществом в этом отношении обладают ударно-волновые методы исследования, позволяющие реализовать одномерное деформирование материалов, которое строго анализируется в рамках фундаментальных законов сохранения. Наибольшее количество публикаций посвящено изучению ударно-волновых свойств композитов на основе углеродных волокон в эпоксидной матрице [1–5]. Авторами [1] показано, что в области низких давлений (менее 10 ГПа) при распространении импульса сжатия поперек волокон формируется одиночная ударная волна, тогда как при движении вдоль волокон наблюдается двухволновая конфигурация. Аналогичный результат получен в работе [2] при регистрации профилей напряжения в однонаправленном композите. Авторами [3–5] зарегистрирована особенность на ударной адиабате композитов, армированных углеродными волокнами, в окрестности 25 ГПа, что, по их мнению, связано с химическим разложением композита при ударном сжатии.

В работе [6] методом манганиновых датчиков давления измерена ударная сжимаемость и скорость звука в композитах на основе стеклянных волокон в интервале давлений до 22 ГПа. Иссле-

дования ударного сжатия и последующей изотропической разгрузки композитов на основе арамидных волокон проведены в [7–10]. Авторами [7] предложен замкнутый подход к построению уравнения состояния арамидного материала до давления 11.3 ГПа с использованием комбинированной экспериментальной и численной методологии. Ударная адиабата аналогичного композита получена в [8] посредством регистрации волновых процессов датчиками давления на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) до 8.2 ГПа. В [9] экспериментальное исследование ударно-волновой сжимаемости армированного арамидным волокном эпоксидного композита при различной ориентации волокон выполнено с помощью интерферометра VISAR при давлениях ударного сжатия до 35 ГПа. Авторами [10] экспериментально исследована ударная сжимаемость органоэластика на основе арамидных волокон в диапазоне давлений 2–29 ГПа и показано, в частности, выполнение соотношения аддитивности для ударной адиабаты. Полученные экспериментальные результаты использованы для построения уравнения состояния композита в широкой области высокоэнергетических состояний [10].

Значительно меньше изучен процесс импульсного разрушения гетерогенных анизотропных композитов. Авторами [11] показано, что в композитах на основе кевларовых волокон максимальная прочность реализуется вдоль волокон. В работе [12] импульсное разрушение композита из углеродных волокон исследовалось методом тейлоровского цилиндрического теста. При этом



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

также наблюдалось влияние ориентации волокон на характер динамического разрушения, однако определяющую роль играла скорость соударения образца с преградой. В [13, 14] показано, что заметное влияние на прочностные характеристики композитов оказывают различные добавки. Особенности разрушения стеклопластика при импульсном растяжении рассмотрены в работе [15], где показано, что откольная прочность композита меньше, чем у эпоксидной смолы. Максимальная откольная прочность зарегистрирована в микрокомпозите на основе кевларовых волокон [16].

Имеющиеся на настоящий момент данные убедительно свидетельствуют о ярко выраженном индивидуальном отклике композитных материалов на импульсное воздействие. В такой ситуации актуальными являются задача эксперименталь-

ного исследования композитов на основе волокон различной природы и выявление общих закономерностей их деформации и разрушения в условиях ударно-волнового воздействия. В данной работе такие исследования выполнены для углепластика и стеклопластика.

## УДАРНО-ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ КОМПОЗИТОВ

**Углепластик.** Углепластик представляет собой композитный материал, состоящий из слоев тканого углеродного волокна и матрицы из эпоксидной смолы. Характерный диаметр волокон – около 10–15 мкм, а их объемная доля в углепластике составляет 68–70%. В качестве матрицы использовалась эпоксидная смола ЭД-10, являющаяся аналогом DER-671. Ударно-волновые свойства этой смолы изучены в [17]. Плотность исследуемых образцов варьировалась в интервале 1.55–1.60 г/см<sup>3</sup>. Для проведения ударно-волновых экспериментов из одного блока углепластика были приготовлены образцы толщиной 3–8 мм и диаметром 40 мм с двумя различными ориентациями волокон (вдоль и поперек направления удара). Скорость звука, измеренная ультразвуковым методом, поперек  $C_{\perp}$  и вдоль  $C_{\parallel}$  волокон составляла 3.0 и 9.4 км/с соответственно. Следует отметить, что скорость звука  $C_{\parallel}$  значительно превышает соответствующее значение для эпоксидной смолы, равное 2.63 км/с [17], и близка к скорости звука в углеродных волокнах, которая варьируется в интервале 12–15 км/с [18].

Схема экспериментов по исследованию ударно-волновых свойств композитов приведена на рис. 1. Разгон ударников 1 осуществлялся взрывными метательными устройствами до скоростей  $W$  от 0.7 до 5.05 км/с [19]. Ударные волны в исследуемых образцах 3 формировались при соударении алюминиевого ударника 1 диаметром 90 мм с экраном 2. Интерферометром VISAR измерялась скорость движения границы образца с водой 4. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной 7 мкм, наклеенной на образец 5. Для определения абсолютного значения скорости отраженное излучение регистрировалось двумя интерферометрами с постоянными 280 и 1280 м/с. В каждом эксперименте поляризационным датчиком 6 фиксировался момент входа ударной волны в образец, что с использованием интерферометрических данных позволяло определить значение волновой скорости  $D$  [17]. Погрешность определения  $D$  составляла  $\pm 0.5\%$ .

Типичные профили скорости при поперечной и продольной ориентациях волокон относительно направления движения ударной волны приведены на рис. 2. Началу отсчета времени на рис. 2 соответствует момент выхода ударной волны на границу с водой. В экспериментах 1, 2 скорость и толщина алюминиевого ударника были 4.6 км/с и 2 мм, в экспериментах 3, 4 – 1.13 км/с и 7 мм.

Наблюдается ярко выраженная зависимость структуры ударных волн от ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны. Причем различие наблюдается во всем исследованном диапазоне давлений ударного сжатия до 33 ГПа. При поперечной ориентации волокон регистрируется одноволновая конфигурация даже при низком давлении. Так, например, в эксперименте 3, профиль скорости для которого приведен на рис. 2, скорость ударной волны равна 2.5 км/с, т.е. ниже скорости звука в данном направлении, и можно было бы ожидать формирования двухволновой конфигурации. В действительности наблюдается лишь размытие фронта в начальный момент времени. При продольном направлении волокон отчетливо выражена двухволновая конфигурация (профили 2, 4 на рис. 2). Скорость распространения предвестника в пределах погрешности измерения совпадает со скоростью звука  $C_{||} = 9.4$  км/с.

На основании проведенных экспериментов на рис. 3 в координатах  $D-u$  построены ударные адиабаты углепластика при распространении ударной волны вдоль и поперек волокон. Ударная сжимаемость углепластика в пределах экспериментальной погрешности практически не зависит от ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны и аппроксимируется единой зависимостью  $D = 2.0 + 1.1u$ , км/с. Символами 5 на рис. 3 указана скорость первой волны в двухволновой конфигурации, формирующейся при распространении ударной волны вдоль волокон. Эти точки соответствуют массовой скорости за фронтом первой волны, однако на рис. 3 они отнесены к полной амплитуде ударного сжатия, что дает наглядную иллюстрацию того, почему во всех проведенных экспериментах наблюдалась двухволновая конфигурация.

**Стеклопластик.** Структура образцов из стеклопластика аналогична структуре углепластика и представляет собой композит, состоящий из слоев тканого стекловолокна и матрицы из эпоксидной смолы. Характерный диаметр волокон около 10–15 мкм, а их объемная доля в стеклопластике составляет 65–68%. Плотность исследуемых образцов равна 1.60 г/см<sup>3</sup>. Измеренные скорости звука для обоих направлений волокон в пределах погрешности совпадают и равны 4.8 км/с. Структура волновых профилей при давлении ударного сжатия ниже 18 ГПа аналогична той, которая регистрируется для углепластика. При распространении ударной волны вдоль волокон формируется отчетливо выраженная двухволновая конфигурация, исчезающая выше 18 ГПа. При поперечном направлении волокон двухволновая конфигурация отсутствует.

В результате обработки экспериментальных данных получена ударная адиабата стеклопластика в координатах “скорость ударной волны  $D$ –массовая скорость  $u$ ” (рис. 3). Ударная сжимае-

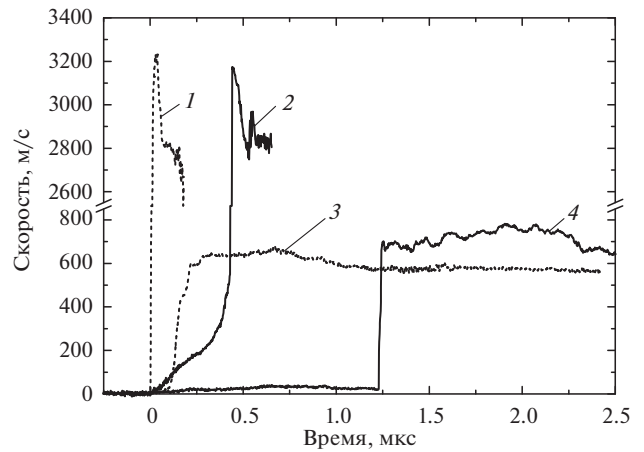


Рис. 2. Профили скорости на границе углепластика с водой для образцов толщиной: 1 – 5.5, 2 – 6, 3 – 7.3, 4 – 8.0 мм; 1, 3 – поперечная ориентация волокон; 2, 4 – продольная.

мость стеклопластика, так же как и углепластика, в пределах экспериментальной погрешности не зависит от ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны и аппроксимируется зависимостью  $D = 2.0 + 0.96u$ , км/с. Скорость распространения первой волны практически совпадает со скоростью звука при нулевом давлении (рис. 3, точки 5, 6).

## ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

**Стеклопластик, углепластик.** Определение прочности композитов при импульсном растяжении осуществлялось в условиях откольного разрушения [19]. Типичные профили скорости свободной

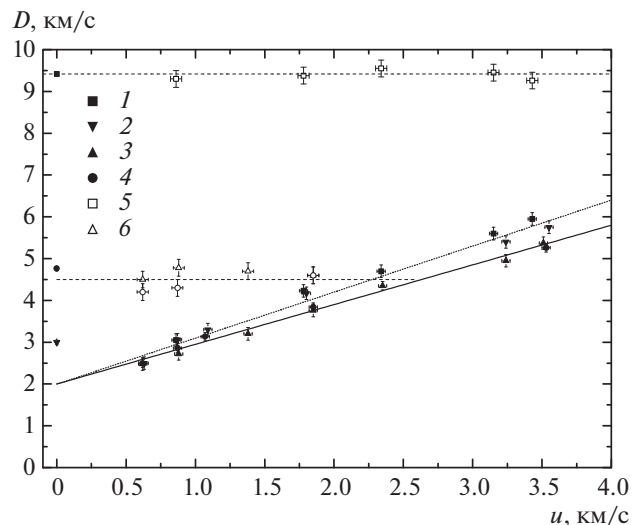
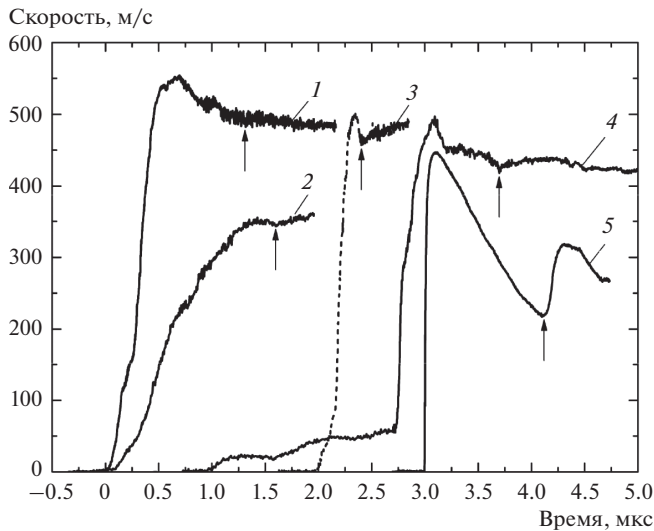


Рис. 3. Ударные адиабаты композитов из углепластика: 1 – вдоль, 2 – поперек волокон; стеклопластика: 3 – вдоль, 4 – поперек волокон; 5 – скорость распространения первой волны углепластика, 6 – стеклопластика.



**Рис. 4.** Профили скорости свободной поверхности: 1, 2 – стеклопластик при распространении ударной волны вдоль (1) и поперек (2) волокон; 3, 4 – углепластик при распространении ударной волны поперек (3) и вдоль (4) волокон; 5 – эпоксидная смола; профили 3–5 сдвинуты по времени.

поверхности показаны на рис. 4. Ударные волны в исследуемых образцах создавались алюминиевыми ударниками толщиной 2 мм, ускоренными до 650 м/с. Началу отсчета времени на рис. 4 соответствует момент выхода ударной волны на свободную поверхность образца. При этом наблюдается скачкообразное увеличение скорости поверхности до максимального значения  $W_0$ . Внутри образца распространяется центрированная волна разрежения, которая, взаимодействуя с падающей волной разгрузки, приводит к внутреннему разрыву – отколу. В процессе разрушения растягивающие напряжения релаксируют к нулю, формируя волну сжатия, которая выходит на свободную поверхность в виде откольного импульса. Отмеченные особенности отчетливо наблюдаются на профиле скорости для эпоксидной смолы (профиль 5 на рис. 4), часто используемой в качестве связующего компонента в композитах. Величина откольной прочности  $\sigma_s$ , характеризующая максимальные растягивающие напряжения в образце, определялась по разности между  $W_0$  и минимумом скорости  $W_m$ , который достигается перед откольным импульсом и отмечен на рис. 4 вертикальными стрелками. Откольная прочность рассчитывалась по формуле

$$\sigma_s = 0.5\rho_0c_0(W_0 - W_m),$$

где  $c_0$  – объемная скорость звука [19]. Для эпоксидной смолы  $\sigma_s = 324 \pm 5$  МПа.

В отличие от эпоксидной смолы, композиты являются гетерогенными анизотропными материалами, поэтому измеренные профили скорости свободной

поверхности стеклопластика и углепластика имеют более сложную структуру. На рис. 4 приведены скорости свободной поверхности при распространении ударной волны вдоль и поперек волокон. В стеклопластике с поперечным направлением волокон (зависимость 2, рис. 4) фронт ударной волны размыт более чем на микросекунду. После достижения максимума скорость спадает примерно на 10 м/с, достигает минимума, который отмечен стрелкой, и далее незначительно возрастает, приводя к формированию слабо выраженного откольного импульса. Для оценки величины откольной прочности скорость звука при нулевом давлении  $c_0$  полагалась равной 2.0 км/с, что соответствует первому коэффициенту в зависимости  $D(u)$ . В этом приближении  $\sigma_s = 16 \pm 1$  МПа. При продольной ориентации волокон на профиле скорости свободной поверхности (зависимость 1, рис. 4) после ее уменьшения примерно на 40 м/с регистрируется особенность, аналогичная откольному импульсу, но далее скорость продолжает уменьшаться, что свидетельствует о сопротивлении откольному разрушению. Вероятно, возникновение особенности обусловлено началом образования пор в образце при растяжении. Откольная пластина при этом не формируется, но порог начала разрушения регистрируется отчетливо, и его величина – около 60 МПа. Вертикальной стрелкой отмечено время, после которого заметный спад скорости отсутствует. Соответствующий перепад ( $W_0 - W_m$ ) равен  $70 \pm 2$  м/с. Значение откольной прочности в данном случае может быть определено лишь приблизительно, поскольку, как показано авторами [20], оно зависит от кинетики откольного разрушения. В частности, в [20] отмечается, что при постоянной скорости разрушения можно использовать приведенное выше расчетное соотношение для определения  $\sigma_s$ . Это дает для величины откольной прочности значение  $110 \pm 3$  МПа.

Отличительной особенностью профиля скорости для углепластика с продольным направлением углеродных волокон (зависимость 4 на рис. 4) является формирование двухволновой конфигурации. Характер откольного разрушения имеет общие со стеклопластиком черты. В частности, в разгрузочной части импульса после падения скорости примерно на 40 м/с на профиле регистрируется резкий излом, скорость остается постоянной в течение примерно 0.2 мкс, а затем продолжает уменьшаться, и лишь после этого формируется характерный откольный импульс (отмечен вертикальной стрелкой). Предполагая, что излом профиля скорости соответствует порогу начала разрушения, находим, что его величина составляет примерно 60 МПа. Перепад скорости ( $W_0 - W_m$ ), соответствующий приходу откольного импульса, равен  $78 \pm 2$  м/с, что дает для величины откольной прочности значение  $125 \pm 3$  МПа. При поперечной ориентации волокон (зависимость 3, рис. 4) двухволновая конфигурация отсутствует, откольный импульс выражен отчетливо и  $\sigma_s = 64 \pm 2$  МПа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные для углепластика и стеклопластика показывают, что гетерогенные анизотропные материалы в условиях ударно-волнового воздействия проявляют ярко выраженные индивидуальные особенности. Это отражается, прежде всего, на структуре ударных волн и величине откольной прочности. В обоих композитах при продольной ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны формируется двухволновая конфигурация. Однако в стеклопластике она реализуется лишь при давлении ударного сжатия менее 18 ГПа, тогда как в углепластике она наблюдалась во всем исследованном диапазоне давления — до 33 ГПа. При этом ударная сжимаемость обоих композитов не зависит от ориентации волокон. В том случае, когда реализуется двухволновая конфигурация, амплитуда предвестника затухает по мере расхождения волн, что связано с релаксационными свойствами композитов и аналогично затуханию упругого предвестника в упруго-пластических средах [18].

Анизотропия композитов проявляется также в зависимости откольной прочности от ориентации волокон относительно направления распространения ударной волны. При параллельной ориентации откольная прочность в несколько раз превышает величину прочности для поперечного направления. При этом величина откольной прочности композитов оказывается ниже прочности эпоксидной смолы, которая часто используется в качестве связующего компонента. Это свидетельствует о том, что разрушение в условиях ударно-волнового воздействия происходит по границе волокно/матрица. Низкие значения откольной прочности стеклопластика при поперечной ориентации волокон согласуются с данными работы [6], но оказываются значительно меньше полученной авторами [15], что подтверждает индивидуальность свойств композитов.

Проведенные исследования показывают, таким образом, что при разработке уравнений состояния и моделей разрушения композитов [20–23] необходимо учитывать анизотропию их свойств, которая проявляется в широком диапазоне давлений при ударно-волновом воздействии. Экспериментальные данные по ударной сжимаемости гетерогенных анизотропных материалов, полученные в данной работе, использованы для уточнения широкодиапазонных уравнений состояния, приведенных в работе [21].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Millett J.C.F., Bourne N.K., Mezjere Y.J.E., Vignjevic R., Lukyanov A. The Effect of Orientation on the Shock Response of a Carbon Fibre–Epoxy Composite // *Compos. Sci. Technol.* 2009. V. 67(15–16). P. 3253.
2. Бордзиловский С.А., Караханов С.М., Мерзиевский Л.А. Структура ударной волны в однонаправленном композите при различной ориентации волокон // *ФГВ.* 1997. № 3. С. 132.
3. Dattelbaum D.M., Coe J.D., Rigg P.A., Scharff R.J., Gammel J.T. Shockwave Response of Two Carbon Fiber-polymer Composites to 50 GPa // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 116. P. 194308.
4. Бушман А.В., Ефремов В.П., Ломоносов И.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударная сжимаемость и уравнение состояния углепластика при высоких плотностях энергии // *ТВТ.* 1990. Т. 28. № 6. С. 1232.
5. Bushman A.V., Efremov V.P., Fortov V.E., Kanel' G.I., Lomonosov I.V., Ternovoi V.Ya., Utkin A.V. Equation of State of Composites under Densities // *AIP Conf. Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 1991.* Williamsburg, Virginia, USA: Elsevier Sci. Publ. B.V., 1992. P. 79.
6. Жук А.З., Иванов А.В., Канель Г.И., Розанов О.К. Сжимаемость и разрушение стеклотекстолита в ударных волнах // *ФГВ.* 1993. Т. 29. № 6. С. 99.
7. Riedel W., Nahme H., Thoma K. Equation of State Properties of Modern Composite Materials: Modeling Shock, Release and Spallation // *AIP Conf. Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 2003.* Portland, Oregon, USA: AIP Publ., 2004. P. 701.
8. Homae T., Shimizu T., Fukasawa K., Masamura O. Hypervelocity Planar Plate Impact Experiments of Aramid Fiber-reinforced Plastics // *J. Reinf. Plast. Compos.* 2006. V. 25. № 11. P. 2015.
9. Mochalova V.M., Utkin A.V., Rykova V.E., Endres M., Hoffmann D.H.H. Shock Compressibility and Spall Strength of Textolite Depending on Fiber Orientation // *Arch. Mech.* 2019. V. 71(4–5). P. 417.
10. Бушман А.В., Ефремов В.П., Канель Г.И., Ломоносов И.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударная сжимаемость и уравнение состояния органопластика при высоких плотностях энергии // *Хим. физика.* 1992. Т. 11. № 3. С. 410.
11. Yang S., Chalivendra V.B., Kim Y.K. Fracture and Impact Characterization of Novel Auxetic Kevlar®/Epoxy Laminated Composites // *Compos. Struct.* 2017. V. 168. P. 120.
12. Frias C., Parry S., Bourne N.K., Townsend D., Soutis C., Withers P.J. On the High-rate Failure of Carbon Fiber Composites // *AIP Conf. Proc. Shock Compression of Condensed Matter – 2015.* Tampa, Florida, USA: AIP Publ., 2016. P. 110011.
13. Taraghi I., Fereidoon A., Taheri-Behrooz F. Low-velocity Impact Response of Woven Kevlar/Epoxy Laminated Composites Reinforced with Multi-walled Carbon Nanotubes at Ambient and Low Temperatures // *Mater. Des.* 2014. V. 53. P. 152.
14. Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Zhang Z.Y., Benameur T., Richardson M.O.W. Impact Response of Kevlar Composites with Nanoclay Enhanced Epoxy Matrix // *Composites: Part B.* 2013. V. 46. P. 7.
15. Zaretsky E., de Botton G., Perl M. The Response of a Glass Fibers Reinforced Epoxy Composite to an Impact Loading // *Int. J. Solids Struct.* 2004. V. 41. P. 569.
16. Katz S., Zaretsky E., Grossman E., Wagner H.D. Dynamic Tensile Strength of Organic Fiber-reinforced Epoxy Micro-composites // *Compos. Sci. Technol.* 2009. V. 69. P. 1250.
17. Мочалова В.М., Уткин А.В., Павленко А.В., Малюгина С.Н., Мокрушин С.С. Импульсное сжатие и рас-

- тяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 1. С. 126.
18. Берлин А.А. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) // Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 57.
  19. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 248 с.
  20. Уткин А.В., Сосиков В.А. Импульсное растяжение этилового спирта при ударно-волновом воздействии // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 4. С. 29.
  21. Ломоносов И.В., Фортвова С.В. Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 596.
  22. Страхов В.Л., Кузьмин И.А., Бакулин В.Н. Комплексное математическое моделирование теплозащиты из высоконаполненных эластомеров // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 278.
  23. Афанасьев В.А., Никитин П.В., Тушавина О.В. Особенности механизма термосилового разрушения углеродных материалов при обтекании сверхзвуковым высокотемпературным воздушным потоком // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 572.