Конев, С.Д. Экспериментальные исследования полимерных композиционных материалов в широком диапазоне скоростей деформации / С.Д. Конев, А.Ю. Константинов, И.В. Сергеичев. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.04 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – С. 39–51.

Perm Polytech Style: Konev S.D., Konstantinov A.Yu., Sergeichev I.V. Experimental Study of Fiber-Reinforced Plastics in a Broad Range of Strain Rates. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 5, pp. 39-51. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.04

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 5, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.04
УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

С.Д. Конев[1], А.Ю. Константинов[2], И.В. Сергеичев[1]

[1]Сколковский институт науки и технологий, Москва, Российская Федерация
[2]Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 12 октября 2024 г.
Одобрена: 25 октября 2024 г.
Принята к публикации: 05 ноября 2024 г.

Ключевые слова:

высокоскоростная деформация, углепластик, разрезной стержень Гопкинсона, полимерные композиты, сервогидравлические машины, плосковолновой удар, электрический взрыв проводника, испытания падающим грузом, механические испытания материалов, испытания на сдвиг.

АННОТАЦИЯ

Представлен обзор методов испытаний полимерных композиционных материалов при высоких скоростях деформации с целью получения механических характеристик прочности и упругости. Отдельное внимание уделено вопросам покрытия диапазонов скоростей деформации, соответствия напряжённо-деформированного состояния (НДС) ожидаемому, соответствия моды разрушения ожидаемой. Изложение материала проходит в парадигме «подход, конфигурация, метод», где под конфигурацией подразумевается геометрия образца и вспомогательной оснастки, подход заключается в создании простой конфигурации со сложным напряженно-деформированным состоянием (неклассический подход) или сложной конфигурации, обеспечивающей однородное НДС (классический подход), а метод есть комбинация конфигурации и испытательного оборудования. Такое изложение позволяет систематизировать большое количество экспериментальных методов, наметить пути их дальнейшего развития.

Также представлены оригинальные методики и результаты испытаний, проведённых авторами с целью обогащения экспериментального инструментария и расширения покрываемого диапазона скоростей деформации. В частности, существенно расширен диапазон скоростей деформации для испытаний однонаправленных углепластиков на растяжение вдоль волокна за счёт применения конфигурации намотанного кольцевого образца в методах гидравлической раздачи кольца (получены скорости деформации порядка $5 \cdot 10^2$ с$^{-1}$) и электрического взрыва проводника (получены скорости деформации $1{,}5 \cdot 10^4$ с$^{-1}$). Диапазон скоростей деформации для растяжения поперёк волокна также был расширен за счёт испытаний на плосковолновой удар. В ходе эксперимента, для скорости растяжения $1{,}5 \cdot 10^4$ с$^{-1}$ получены значения прочности в 45 и 55 МПа, что в два с половиной раза больше, чем прочность в статическом эксперименте.

© **Конев Степан Дмитриевич** – аспирант, центр технологий материалов, e-mail: s.konev@skoltech.ru.
Константинов Александр Юрьевич – д. ф.-м. н., доц., проф. кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики Института информационных технологий, математики и механики, e-mail: konstantinov@mech.unn.ru.
Сергеичев Иван Валерьевич – к. ф.-м. н., доц., директор центра технологий материалов, e-mail: i.sergeichev@skoltech.ru.

Stepan D. Konev – graduate student, Center for Materials Technologies, e-mail: s.konev@skoltech.ru.
Aleksandr Yu. Konstantinov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics, Institute of Information Technologies, Mathematics and Mechanics, e-mail: konstantinov@mech.unn.ru.
Ivan V. Sergeichev – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Center for Materials Technologies, e-mail: i.sergeichev@skoltech.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EXPERIMENTAL STUDY OF FIBER-REINFORCED PLASTICS IN A BROAD RANGE OF STRAIN RATES

S.D. Konev[1], A.Yu. Konstantinov[2], I.V. Sergeichev[1]

[1]Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation
[2]Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 October 2024
Approved: 25 October 2024
Accepted for publication:
05 November 2024

Keywords:

high strain rate, carbon fiber reinforced plastic, Split Hopkinson Pressure Bar, polymer composite materials, servohydraulic testing machine, plate impact, exploding wire, drop weight test, mechanical testing of materials, shear test.

ABSTRACT

The paper presents a review of testing fiber-reinforced plastics for strength and elasticity characteristics at high strain rates. Particular attention is paid to strain rate ranges covered, conformity of stress state to the expected one, and validity of failure mode. The review is presented in an “approach, configuration, method” paradigm, where the configuration means geometry of the specimen and auxiliary equipment, the approach is either to create a simple configuration with a complex stress state (non-classical approach), or a complex configuration providing a homogeneous stress state (classical approach). Finally, the method is a combination of configuration and test facilities. This narration logic allows us to systematize a large number of experimental methods and outline the ways of their further development.

In addition, the paper presents original methods and results of the tests carried out by the authors. These methods add to a collection of experimental techniques and expand the range of strain rates covered. In particular, the strain rate range for tensile tests of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics along fibers is significantly extended by applying the configuration of a wound ring specimen, in the methods of ring expansion (strain rates of the order of $5 \cdot 10^2$ s^{-1} are obtained) and exploding wire (strain rates of $1.5 \cdot 10^4$ s^{-1} are obtained). The range of strain rates for tension transverse to fibers was also extended by plate impact tests. In the experiment, strength values of 45 and 55 MPa were obtained for a tensile strain rate of $1.5 \cdot 10^4$ s^{-1}, which is two and a half times higher than the strength in static experiments.

Введение

Определение влияния скорости деформации на механическое поведение полимерных композиционных материалов (ПКМ) требуется для проектирования энергопоглощающих систем и конструкций для нужд авиации [1–3], автомобильной техники [4; 5], проектирования сосудов, работающих под давлением [6] и элементов защиты [7], устойчивых к высокоскоростным столкновениям. Для создания таких систем используются гибридные [8] и традиционные композиты [9; 10] на полимерной основе, а также металлокомпозиты [11]. Современный инженерный подход к созданию таких систем и конструкций подразумевает, что в начале поведение конструкции моделируется, а потом проводятся натурные испытания при высоких скоростях деформации. Важно, чтобы применяемые при моделировании механические характеристики материалов были получены на основе высокоскоростных, а не квазистатических испытаний элементарных образцов. В противном случае поведение конструкции при моделировании не соответствует реальному [12].

Несмотря на развитие методов и инструментальных средств экспериментальных исследований материалов различной физической природы [13], задача определения механических характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) в широком диапазоне скоростей деформации остается актуальной.

Приводится обзор методов определения механических характеристик и предложены собственные наработки авторов по данной теме. Необходимо заметить, что за пределами данного обзора оставлены методы исследования такой важной характеристики, как трещиностойкость при высоких скоростях деформации, так как эта тема настолько обширна, что требует отдельного обзора. Также не будут упоминаться исследования таких прочностных характеристик, как параметры многоосных критериев разрушения [14], так как экспериментальные методы для данной задачи отчасти те же, что и для «простых» характеристик, или же, наоборот, являются уникальными [15] и не распространены широко.

1. Подходы к испытаниям: общие замечания

В настоящее время идёт не только совершенствование старых, но и поиск новых методов и подходов к испытаниям ПКМ при высоких скоростях деформации. Обзор на эту тему был в своё время представлен Perry & Walley [16].

1.1. Классический подход к испытаниям

Классический подход к механическим испытаниям образцов (в отличие от испытаний конструкций и сложных объектов) заключается в следующем:

1. Разработка геометрии образца и метода передачи нагрузки, которые бы обеспечивали однородное напряженно-деформированное состояние (НДС) в границах расчётной области.

2. Поиск подходящих методов регистрации измеряемых величин (сила, перемещение и т. д.) и их пересчёта в параметры испытания: напряжения, перемещения,

деформации, скорости деформаций. Обычно, здесь выбор невелик.

3. Валидация результатов пунктов 1 и 2, то есть подтверждение того, что НДС действительно однородно, применяемые методы регистрации выдают необходимые параметры с допустимой погрешностью.

Дополнительная сложность применения данного подхода к испытаниям в высокоскоростной области заключается в слове «однородное» из пункта 1, так как требуется не только пространственная, но и временна́я однородность. То есть в ходе эксперимента НДС не должно заметно меняться. Эмпирическое правило, предложенное в [17], говорит о том, что волновые процессы в образце прекратятся за время τ, равное

$$\tau = c\pi l, \qquad (1)$$

где c – скорость распространения соответствующих малых возмущений в образце (продольных для испытаний на сжатие и растяжение и поперечных для крутильных испытаний на сдвиг), l – длина образца.

Также в ходе эксперимента должна оставаться постоянной и скорость деформации.

1.2. Проблемы измерения модуля упругости при классическом подходе

Для инженерных расчётов практически наиболее важно охарактеризовать упругое поведение материала при самых малых деформациях (в начале диаграммы «напряжение – деформация»). К сожалению, при высокоскоростных испытаниях именно начало процесса деформации образца максимально неравновесно, поэтому некоторые авторы [18] категорично утверждают, что, например, установки по типу разрезного стержня Гопкинсона не подходят для измерения модуля упругости.

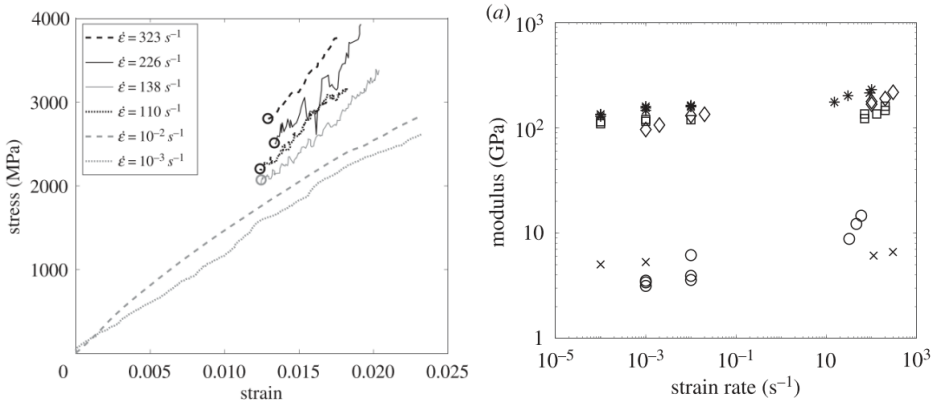
Впрочем, в случае композитных материалов, армированных непрерывным волокном в одном направлении, при испытании вдоль волокон характерна линейность зависимости напряжения от деформации вплоть до момента разрушения. Это позволяет при высокоскоростных испытаниях определять модуль не по начальному, а по среднему или конечному участку с минимальной систематической ошибкой. По-видимому, многие авторы, занимающиеся подобными испытаниями, именно так и делают, иначе непонятно, как они могли бы получить значения модуля по представленным графикам (рис. 1).

1.3. Неклассический подход к испытаниям

Неклассический подход заключается в создании сложного НДС в образце, регистрации полного поля деформаций на его поверхности методом корреляции цифровых изображений (КЦИ) и попытке «угадать» параметры, моделируя происходящие процессы методом конечных элементов (КЭ) [20–23]. Данный подход может позволить заглянуть в ту область диапазонов параметров испытаний, при которых классический подход не позволяет поставить эксперимент. В частности, вышеуказанные статьи позволяют получить значения прочности при растяжении для скоростей деформации до 2000 c^{-1}.

2. Испытательные установки в классическом подходе

Применяемые при классическом подходе экспериментальные установки и характерные скорости деформации приведены в табл. 1.



a b

Рис. 1. Показаны две диаграммы квазистатического нагружения и несколько диаграмм динамического нагружения. Кружком показана точка, где начало выполняться условие равновесия (*a*). До этой точки зависимость «напряжение – деформация» построить невозможно, тем не менее авторы измеряют модуль упругости (*b*) (изображения приводятся из [19])

Fig. 1. On the left are two quasi-static loading diagrams and several dynamic loading diagrams. The circle shows the point where the equilibrium condition starts to be satisfied (*a*). Before this point, the stress – strain relationship cannot be constructed; however, the authors measure the elastic modulus (*b*) (images from [19])

Таблица 1

Испытательные установки, применяемые при классическом подходе

Table 1

Test setups used in the classical approach

Испытательные установки	Диапазон скоростей деформации для ПКМ, $с^{-1}$
Падающий груз, маховик, маятниковый копёр	1 – 100
Сервогидравлическая машина	1 – 100
Разрезной стержень Гопкинсона (РСГ)	100 – 1000 (100 для растяжения)
Плосковолновой удар	10^4 – 10^5
Взрыв проводника	10^4 – 10^5

2.1. Испытательные установки низкого диапазона скоростей деформации

В последнее время появляется всё больше статей, описывающих применение высокоскоростных сервогидравлических машин для испытаний полимерных композитов. Связано это, по-видимому, с тем, что крупные производители испытательного оборудования осваивают нишу высокоскоростных испытаний и совершенствуют свою продукцию. Spronk [24] в своей статье даёт анализ разных факторов, влияющих на предельную скорость деформации при растяжении, которая, по его оценке, лежит между 10 и 100 $с^{-1}$. Примерно такие же предельные значения получаются для испытаний на сжатие. Так, если в довольно старой статье Daniel [25] получал скорости деформации при сжатии не выше 10 $с^{-1}$, то даже спустя пятнадцать лет Duan [26] получил максимум 50 $с^{-1}$.

Схожими параметрами скоростей деформации обладают все установки, использующие инерцию: вертикальные и маятниковые копры, маховики.

2.2. Испытательные установки среднего диапазона скоростей деформации

В диапазоне скоростей до 10^3–10^4 $с^{-1}$ доминирующее положение занимают установки по принципу разрезного стержня Гопкинса [27; 28]. Их отличает простая конструкция, простой принцип работы и невысокая цена изготовления. Многие из них самодельные и успешно справляются со своими задачами.

3. Методические аспекты испытаний ПКМ на сжатие при высоких скоростях деформации

Бóльшая часть результатов высокоскоростных испытаний ПКМ относятся к испытаниям на сжатие. Тем не менее нельзя сказать, что найдена конфигурация, свободная от серьёзных проблем.

В общем случае есть только три способа передать сжимающую нагрузку на образец; прямое нагружение в торец за счёт усилий сдвига и комбинации первых двух способов (более подробно см. п. 5.2 в [29]). На рис. 2 проиллюстрированы все три способа. Для квазистатических испытаний все три примерно равнозначны, но для динамических испытаний (при классическом подходе) важно, чтобы образец был как можно короче. Тогда в нём быстрее установится однородное НДС и можно будет получать значения характеристик при бóльших скоростях деформации. Таким образом, способ «прямого» нагружения в торец является, очевидно, предпочтительным, и действительно он наиболее популярен, судя по литературным данным.

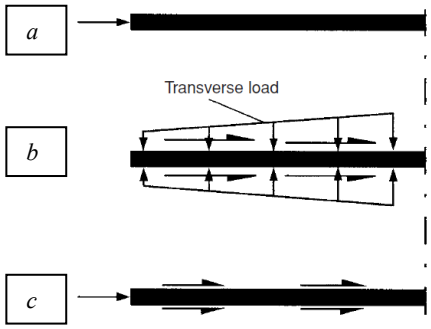


Рис. 2 Иллюстрация методов передачи сжимающего усилия на образец. Показана часть образца: *a* – «прямое» нагружение в торец; *b* – нагружение за счёт усилий сдвига; *c* – комбинированное нагружение (приводится из [3])

Fig. 2. Illustration of methods for transferring compressive force to a sample. Part of the sample is shown: *a* – “direct” loading at the end; *b* – loading due to shear forces; *c* – combined loading (image from [3])

Однако при нагружении в торец на нём возникают концентраторы напряжения, в силу неидеальной гладкости и прилегания плоскостей оснастки и образца. Это приводит к инициации растрескивания и занижению прочностных характеристик. Именно так в большинстве случаев проводятся испытания композитов [30]. Для сильно ортотропных ПКМ, армированных непрерывным волокном, в случае испытаний вдоль направления армирования занижение становится существенным. Есть три способа бороться с этим.

Первый способ заключается в применении комбинированного нагружения (см. рис. 2, *c*). Так сделано, например, в [31; 32] для испытаний на разрезном стержне Гопкинсона (РСГ). Однако скорости деформации в данном случае на порядок меньше тех, которые получаются при прямом нагружении (так как длина образца на порядок больше).

Второй способ заключается в испытании квазиизотропных укладок из однонаправленных слоёв и экстракции свойств слоя с продольной ориентацией с помощью ламинатной теории, как, например, сделано в [32]. В статье сравниваются результаты, полученные на однонаправленных образцах и квазиизотропной укладке. Расхождения существенны, что в очередной раз подтверждает условность предположений, лежащих в основе ламинатной теории.

Третий способ заключается в заневоливании поперечного расширения образца вблизи поверхности нагружения [14]. В этом случае локально подавляются основные механизмы разрушений однонаправленных композитов при сжатии: локальная потеря устойчивости волокон и растрескивание вдоль волокон. Thomson (пункт 5.2.2.4 из [14]) получил значения прочности в статике вдоль волокна для однонаправленного композита IM7/8552 в районе 1,7 ГПа, что превышает значения из других литературных источников [33]. Однако результаты, полученные им на установке РСГ, противоречивы, так как прочность вдвое ниже, чем в статике.

Используя вышеупомянутый третий способ, авторам данной статьи удалось получить скорости деформации между 100 и 1000 $с^{-1}$ на однонаправленных образцах композита T700/LY113 [34]. Однородность НДС и валидность разрушения обоснованы моделированием методом конечных элементов и видеофиксацией эксперимента.

4. Конфигурации и методы, применяемые для испытаний на растяжение

При испытаниях на растяжение традиционно используются образцы с зоной для закрепления в установке, где или наклеены накладки, или увеличено сечение образца. Конструкция механизма закрепления для динамического испытания не может быть слишком массивной, а это значит, что экспериментатор или вынужден вклеивать образец [35], что трудозатратно, или применять оригинальную геометрию образца, как, например, в работе [36], где специальные зажимы имели грани, скошенные в таком направлении, что сила зажима увеличивалась при прохождении импульса растяжения за счёт инерции (рис. 3). В любом случае необходимо принимать ограничения метода закрепления как данность, уменьшая сечение образца. Так, в работе [37] это предельное значение составило 2 кН.

4.1. Метод растяжения кольцевого образца в установке РСГ на сжатие

В то же время уже давно предложен метод растяжения кольцевого образца из композита [38]. В оригинальной статье растяжение проходило за счёт взрыва в жидкости. Позднее Zhou [19] создал оснастку, позволявшую использовать для сжимания жидкости установку РСГ. Он испытывал арамидные волокна, намотанные на резиновый сальник. Волокна не были пропитаны связующим, поэтому это нельзя считать испытанием композита.

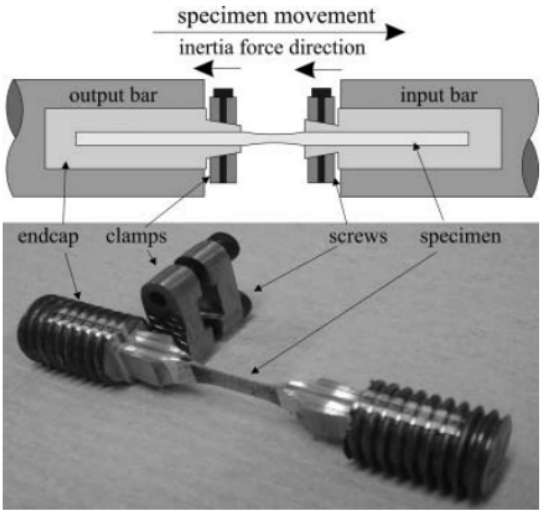


Рис. 3. Оригинальный способ закрепления образца однонаправленного стеклопластика в установке прямого растяжения по принципу разрезного стержня Гопкинсона. При прохождении импульса инерция съемных зажимов помогает упрочнить клеевое соединение образца и накладок вблизи расчетной зоны (приводится из [36])

Fig. 3. An original method of fixing a unidirectional fiberglass sample in a split Hopkinson tension bar. When the pulse passes, the inertia of the removable clamps helps to strengthen the adhesive bond between the sample and the pads near the design zone (image from [36])

Метод был модифицирован и применен в НИИ механики ННГУ для испытания кольцевых образцов из намотанного композита [39]. Кольцевой образец с наклеенным тензорезистивным датчиком деформации устанавливался в оснастку, которая надевалась на мерные стержни установки Колького на сжатие (рис. 4).

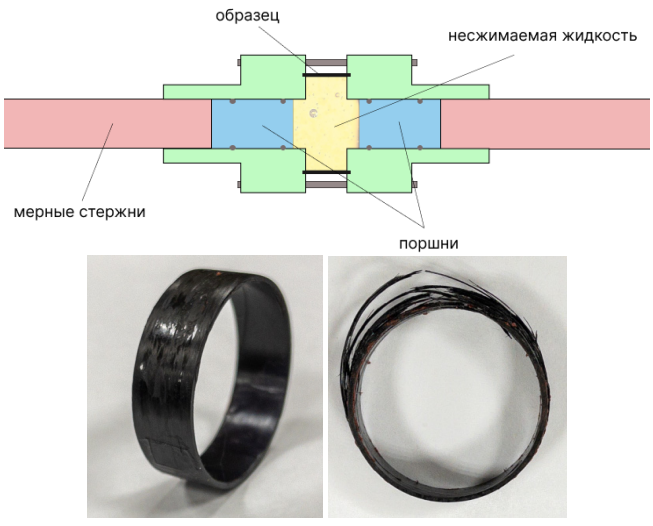


Рис. 4. Схема метода растяжения кольцевого композитного образца и вид образца до и после испытаний

Fig. 4. Schematic diagram of the tensile testing method for a ring composite specimen and the specimen before and after testing

В результате достигнуты значения скорости деформации 660 c^{-1}, что невозможно обеспечить на традиционных растягивающих модификациях РСГ. Получены значения прочности вдоль волокна 1914 ± 176 МПа, что практически не отличается от статических значений и подтверждается работами [37; 40].

4.2. Метод растяжения кольцевого образца электрическим взрывом проводника

Описанная ранее конфигурация кольцевого образца для растяжения оказывается удобной и для больших скоростей испытаний. Максимальную скорость деформации без использования взрывчатых веществ можно получить за счёт электрического взрыва проводника. Этот метод в применении к ПКМ был предложен авторами публикации [41]. Образцы изготавливались методом намотки на цилиндры из ППМА. Вдоль оси цилиндра высверливалось отверстие, в него продевался проводник, который взрывался проходящим током. Лазерный интерферометр записывал скорость свободной поверхности. Схема установки приводится на рис. 5, *a*.

В результате для растяжения вдоль волокна материала T700/LY113 получена прочность на растяжение около 3 ГПа, что в полтора раза выше статических значений.

4.3. Плосковолновой удар

Испытания на плосковолновой удар проводятся десятилетиями, но таковых для полимерных композитов до сих пор не было. Суть метода описана в [42], пластина-мишень испытывает соударение с летящей на высокой скорости в вакууме пластиной, как правило, из того же материала. Скорость свободной (задней) поверхности мишени регистрируется интерферометром.

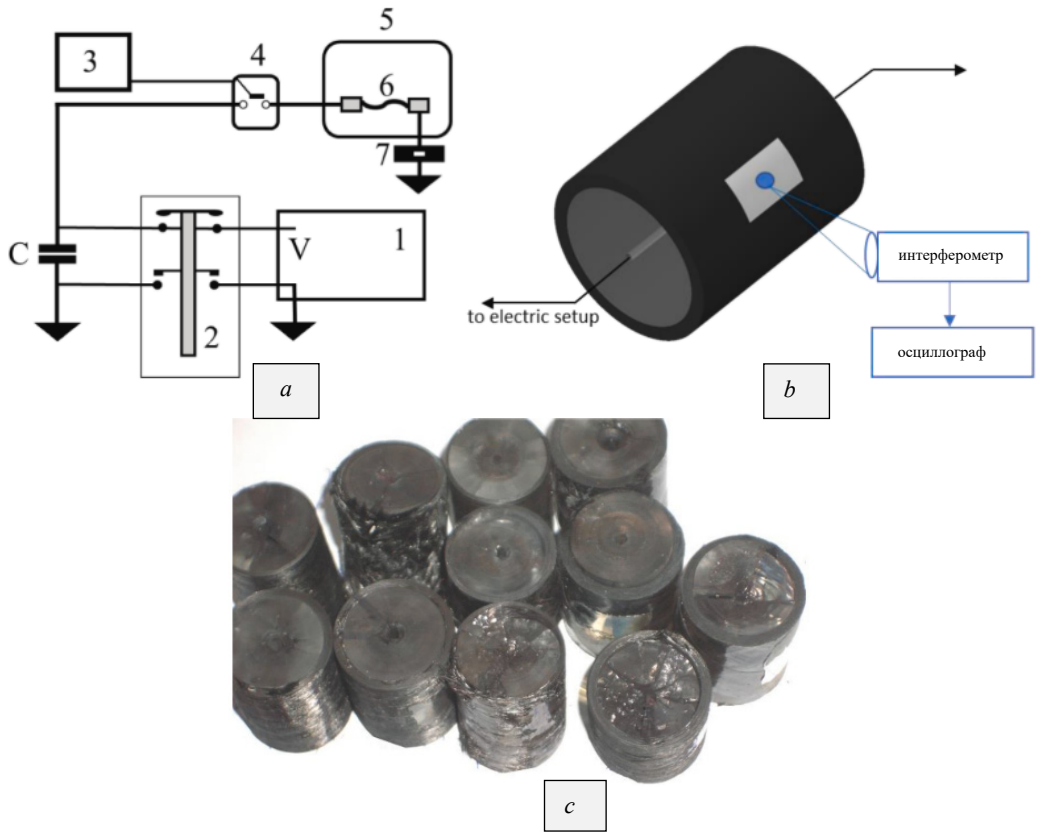
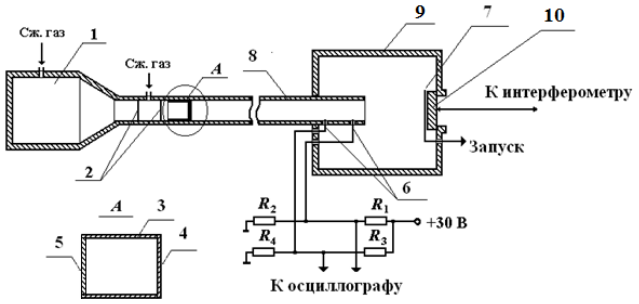


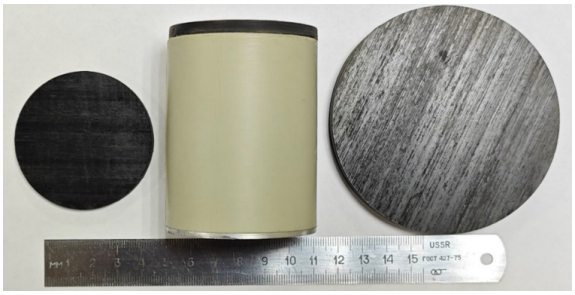
Рис. 5. Метод взрыва проводника для растяжения трубчатых образцов из однонаправленных композитов. Электрическая схема, обеспечивающая взрыв проводника (*a*): *1* – зарядное устройство; *2* – контроллер уровня заряда конденсатора C; *3* – управление разрядом, *4* – разряжающий ключ; *5* – взрывная камера; *6* – проводник (внутри образца); *7* – катушка Роговского Схема эксперимента (*b*); показан образец на цилиндре из ППМА, алюминиевое напыление для работы лазерного интерферометра, ход проводника по центру цилиндра. Испытанные и не испытанные образцы вместе (*c*) (приводится из [41])

Fig. 5. Exploding wire method for stretching tubular samples made of unidirectional composites. Electrical circuit providing conductor explosion (*a*): *1* – charger; *2* – charge level controller of condenser C; *3* – discharge control; *4* – discharge key; *5* – explosion chamber; *6* – conductor (inside the sample); *7* – Rogowski coil; explanations in the text. Experimental scheme (*b*); shows a sample on a PPMA cylinder, aluminum sputtering for the laser interferometer, and the conductor running along the center of the cylinder. Tested and untested samples together (*c*) (images taken from [41])

В НИИ механики ННГУ впервые был применен метод плосковолнового удара для испытаний образцов из однонаправленного углепластика на растяжение поперёк волокон. Испытания проводились на установке ПГ-57, описанной в [43]. Схема установки приведена на рис. 6, показана газовая пушка (*1*) с двухдиафрагменным затвором (*2*), ударник (*3*), пластина-ударник из необходимого материала (*4*). Для предотвращения отрыва пластины–ударника от полипропиленового стакана во время разгона (выдувания сжатым воздухом) к задней части полипропиленового цилиндра приклеивалось дно из сплава Д16Т (*5*), электроконтактные датчики (*6*), запускающий контакт (*7*), ствол пушки (*8*), вакуумная камера (*9*), исследуемый образец (*10*).



a



b



c

Рис. 6. Схема установки для плосковолнового удара (*a*); ударник, ударник на стакане, образец (*b*); вид испытанного образца (*c*)

Fig. 6. Diagram of the plate impact setup (*a*); striker, striker on the cup, sample (*b*); view of the tested sample (*c*)

В результате соударения пластин происходил откол на задней поверхности (см. рис. 6). Откольная прочность при данной ориентации волокон соответствует прочности на растяжение поперёк волокон. В ходе эксперимента для скорости растяжения $1{,}5 \cdot 10^4$ с$^{-1}$ получены значения прочности в 45 и 55 МПа, что в два с половиной раза больше, чем прочность в статическом эксперименте.

5. Конфигурации и методы, применяемые для испытаний на сдвиг

Для испытаний на сдвиг применяются разнообразные конфигурации. Выбор той или иной конфигурации должен в первую очередь зависеть от того, в каком направлении будет испытание.

Недостатком слоистых композитов является относительно низкая межслоевая прочность (направление 1–3). Однако для экспериментального исследования этот недостаток оказывается удобным при испытаниях на крутильных модификациях РСГ [44], так как позволяет закреплять образец на стержнях с помощью эпоксидного клея, как показано на рис. 7 (*c*). Подробно про крутильную модификацию можно прочесть в [45; 46].

Ещё более универсальную конфигурацию для испытаний на межслоевой сдвиг, изображённую на рис. 7 (*e*, *f*), предложили Dong & Harding [47]. Они усовершенствовали предложенную ранее версию (см. рис. 7 (*d*)) двойного образца для традиционных установок РСГ на сжатие и получили большие значения прочности за счёт того, что в их версии на поверхности между сдвигаемыми слоями отсутствовали нормальные составляющие тензора напряжений. Похожая геометрия образца была ранее применена [48] для испытаний на растягивающей модификации РСГ. В последней работе определяется оптимальная геометрия, подходящая как для измерения сдвиговой прочности, так и модуля сдвига в направлении 1–3 (см. рис. 7 (*g*)).

Прочность на сдвиг в плоскости ламината также важна, и для этих испытаний применяются образцы, вырезанные под углом к направлению 0°, которые впоследствии испытываются на сжимающих [25; 49] или растягивающих установках РСГ (см. рис. 5 в [50]).

Не стоит забывать и о простейшей конфигурации для испытаний на сдвиг – трёхточечном изгибе, как это было сделано в одной из первых работ на эту тему [51]. Притом, что напряженное состояние при изгибе неоднородно, геометрия образца проста.

Заключение

В предложенном обзоре показано текущее состояние дел в области высокоскоростных испытаний полимерных композитов с методической точки зрения. Конечной целью обозначенного выше классического подхода являются экспериментально полученные зависимости прочностей, модулей (в разных направлениях) от скорости деформации. Немаловажно, чтобы разные методы, применяемые на разных скоростях деформации, использовали одну и ту же конфигурацию образца. Это позволит получать достоверные зависимости меха-

нических характеристик от скорости деформации. По мнению авторов, это является одним из направлений развития классического подхода, которому они сами и следуют. На рис. 8 показаны полученные ими, упомянутые в данной статье и частично опубликованные [34; 41] значения прочности однонаправленного углепластика T700/LY113 на широком диапазоне скоростей деформаций. Красными линиями показаны аппроксимации, приведенные в табл. 2.

Развитие неклассического подхода, заключающегося в создании сложного НДС в образце, регистрации полного поля деформаций на его поверхности методом корреляции цифровых изображений и последующего моделирования, связано с развитием программных алгоритмов. Статьи, где из одного эксперимента получаются параметры некоторой сложной модели уже есть, и их число растёт [21; 52], в том числе и в связи с развитием искусственного интеллекта [53].

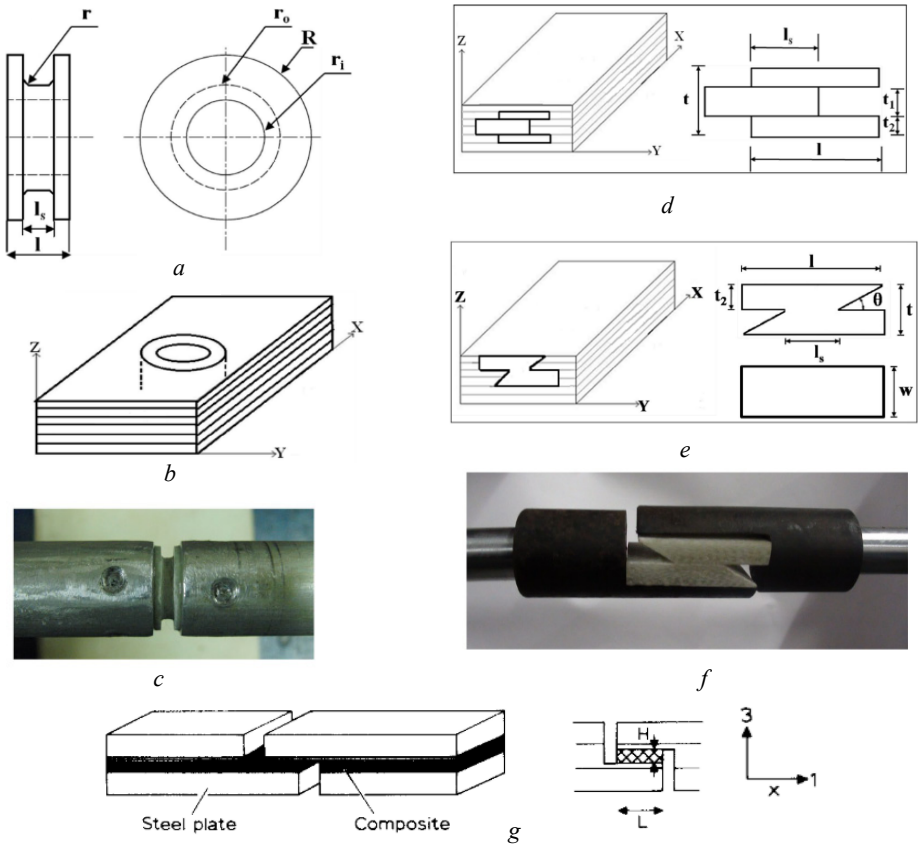


Рис. 7. Конфигурации для высокоскоростных испытаний ламинатов на межслоевой сдвиг. Чертёж образца для крутильной модификации РСГ (*a*), схема вырезки (*b*), вид образца, вклеенного между стержней (*c*). Чертежи и схемы вырезки образцов для испытаний на сжимающих установках РСГ (*d–f*), вид установленного образца (*f*). Изображения взяты из [50]; (g) – конфигурация из [48] для испытаний на растягивающих РСГ, подходящая как для измерения сдвиговой прочности, так и модуля сдвига в направлении 1–3

Fig. 7. Configurations for high-speed interlaminar shear testing of laminates. Drawing of a specimen for the torsional SHPB modification (*a*), cutting scheme (*b*), view of the specimen glued between the rods (*c*). Drawings and cutting schemes of specimens for testing on classic SHPB (*d*, *e*), view of the installed specimen (*f*). The images are taken from [50]; (*g*) configuration from [48] for testing on tensile RSG, suitable for both measuring the shear strength and the shear modulus in the 1–3 direction

Таблица 2

Полученные авторами экспериментальные зависимости прочности однонаправленного углепластика T700/LY113 от скорости деформации

Table 2

The experimental dependences of the strength of unidirectional carbon fiber T700/LY113 on the deformation rate obtained by the authors

Параметр	Значение
Растяжение поперек волокон	$\sigma_{22}^{+}\left[\text{МПа}\right]=21+1,9\cdot10^{-3}\dot{\varepsilon}$
Растяжение вдоль волокон	$\sigma_{11}^{+}\left[\text{МПа}\right]=1888+57\cdot10^{-3}\dot{\varepsilon}$
Сжатие поперек волокон	$\sigma_{22}^{-}\left[\text{МПа}\right]=203+9,0\cdot\ln\left(\dot{\varepsilon}\right)$
Сжатие вдоль волокон	$\sigma_{11}^{-}\left[\text{МПа}\right]=800+30\cdot\ln\left(\dot{\varepsilon}\right)$

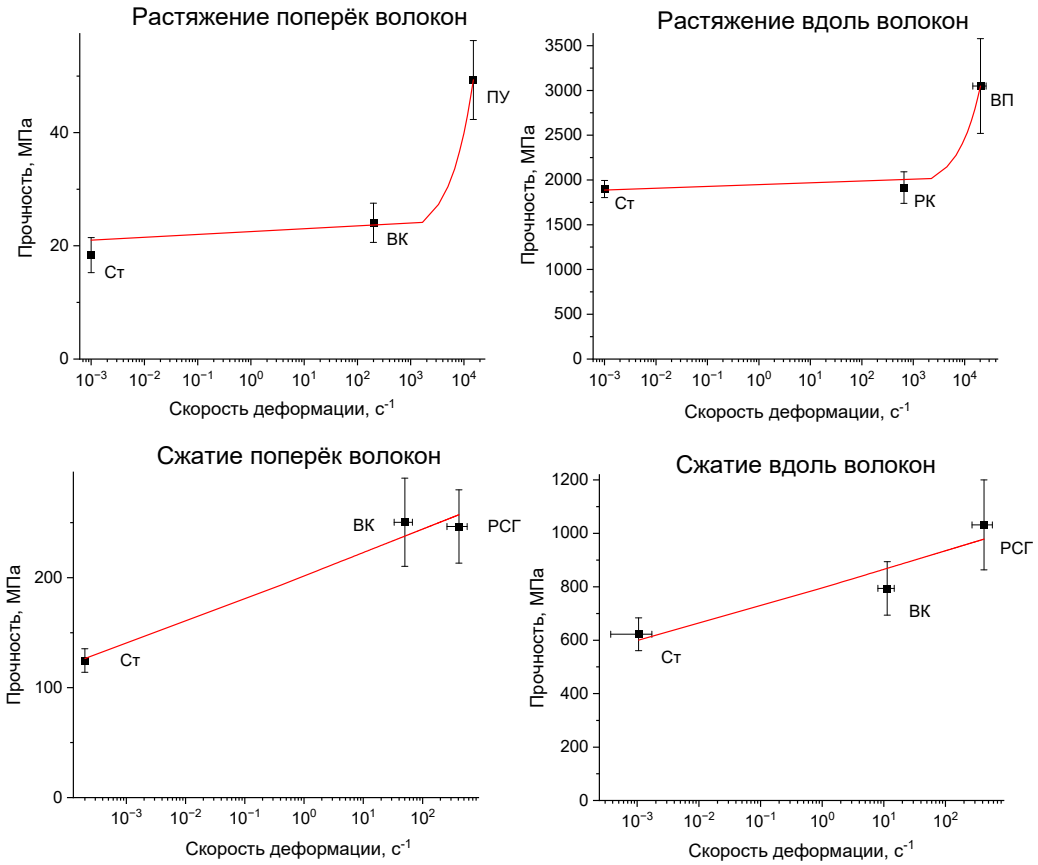


Рис. 8. Экспериментальные зависимости прочности однонаправленного углепластика Т700/LY113 от скорости деформации, полученные авторами с использованием различных экспериментальных методов: Ст – квазистатические испытания, ВК – вертикальный копер, РСГ – разрезной стержень Гопкинсона, ВП – взрыв проводника, РК – растяжение кольцевого образца, ПУ – плосковолновой удар

Fig. 8. Experimental dependences of the strength of unidirectional carbon fiber T700/LY113 on the strain rate, obtained by the authors using various experimental methods: St – quasi-static tests, VK – drop weight test, RSG – Split Hopkinson Pressure Bar, VP – exploding wire method, RK – ring specimen tension, PU – plate impact

Библиографический список

1. Crushing of composite tubular structures and energy absorption for aircraft seats development / J.E. Chambe, O. Dorival, C. Bouvet, J.F. Ferrero // ECCM 2018 – 18th European Conference on Composite Materials. – 2020.

2. Ren, Y. A novel aircraft energy absorption strut system with corrugated composite plate to improve crashworthiness / Y. Ren, H. Zhang, J. Xiang // International Journal of Crashworthiness. – 2018. – Vol. 23, no. 1. – P. 1–10.

3. Chen, P.W. Evaluation on crashworthiness and energy absorption of composite light airplane / P.W. Chen, Y.Y. Lin // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10, no. 8. – P. 1–12.

4. Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading / G. Zhu, G. Sun, H. Yu [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 135. – P. 458–483.

5. Crashworthiness of automotive composite material systems / G.C. Jacob, J.F. Fellers, J.M. Starbuck, S. Simunovic // Journal of Applied Polymer Science. – 2004. – Vol. 92, no. 5. – P. 3218–3225.

6. A comparative study of impact effect of composite cylinders and type IV pressure vessels / N.H. Farhood, S. Karuppanan, H.H. Ya, W.E. Abdul-Lateef // Emerging Materials Research. – 2021. – Vol. 10, no. 2. – P. 206–217.

7. Scazzosi, R. Numerical simulation of high-velocity impact on fiber-reinforced composites using MAT_162 / R. Scazzosi, M. Giglio, A. Manes // Material Design and Processing Communications. – 2021. – Vol. 3, no. 3.

8. Mousavi, M.V. Investigation of energy absorption in hybridized fiber-reinforced polymer composites under high-velocity impact loading / M.V. Mousavi, H. Khoramishad // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – Vol. 146. – P. 103692.

9. Deb, A. Crashworthiness design issues for lightweight vehicles / A. Deb // Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. – Elsevier, 2021. – P. 433-470.

10. Effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption in polymer composites / M.R.R. Nurul Fazita, H.P.S.P.S. Abdul Khalil, A. Nor Amira Izzati, S. Rizal // Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. – Elsevier, 2019. – P. 51–78.

11. Ismail, A.E. Modeling of crushing mechanisms of hybrid metal/fiber composite cylindrical tubes / A.E. Ismail, K.-A. Kamarudin // Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-

Reinforced Composites and Hybrid Composites. – Elsevier, 2019. – P. 27–39.

12. Ahmad, B. Strain rate-dependent crash simulation of woven glass fabric thermoplastic composites / B. Ahmad, X. Fang // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2022. – Vol. 41, no. 15–16. – P. 637–658.

13. Review of Intermediate Strain Rate Testing Devices / T. Bhujangrao, C. Froustey, E. Iriondo [et al.] // Metals. – 2020. – Vol. 10, no. 7. – P. 894.

14. Thomson, D.M. Physically-based meso-scale modelling of unidirectional CFRPs for impact loading applications – PhD Thesis / D.M. Thomson. – 2019.

15. Achieving synchronous compression-shear loading on SHPB by utilizing mechanical metamaterial / Q. Ren, Y. Zhang, L. Hu [et al.] // International Journal of Impact Engineering. – 2024. – Vol. 186. – P. 104888.

16. Perry, J.I. Measuring the Effect of Strain Rate on Deformation and Damage in Fibre-Reinforced Composites: A Review / J.I. Perry, S.M. Walley // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2022. – Vol. 8, no. 2. – P. 178–213. DOI: 10.1007/s40870-022-00331-0

17. Davies, E.D.H. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar / E.D.H. Davies, S.C. Hunter // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1963. – Vol. 11, no. 3.

18. George T. (Rusty) Gray, I. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing / I. George T. (Rusty) Gray // Mechanical Testing and Evaluation. – Ohio: ASM International, 2000. – P. 462–476.

19. A new technique for tensile testing of engineering materials and composites at high strain rates / J. Zhou, A. Pellegrino, U. Heisserer [et al.] // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2019. – Vol. 475, no. 2229. – P. 20190310.

20. Blitterswyk, J. Van. High-Strain Rate Interlaminar Shear Testing of Fibre-Reinforced Composites Using an Image-Based Inertial Impact Test / J. Van Blitterswyk, L. Fletcher, F. Pierron // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series / 2019. – Vol. 1. – P. 279–281.

21. Fletcher, L. A Novel Image-Based Inertial Impact Test (IBII) for the Transverse Properties of Composites at High Strain Rates / L. Fletcher, J. Van-Blitterswyk, F. Pierron // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – P. 65–92.

22. Blitterswyk, J. Van. Characterisation of the Interlaminar Properties of Composites at High Strain Rates: A Review / J. Van Blitterswyk, L. Fletcher, F. Pierron // Advanced Experimental Mechanics. – 2017. – Vol. 2. – P. 3–28.

23. Blitterswyk, J. Van. Image-Based Inertial Impact Test for Composite Interlaminar Tensile Properties / J. Van Blitterswyk, L. Fletcher, F. Pierron // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2018. – Vol. 4, no. 4. – P. 543–572.

24. Stress-strain synchronization for high strain rate tests on brittle composites / S.W.F. Spronk, E. Verboven, F.A. Gilabert [et al.]. // Polymer Testing. – 2018. – Vol. 67, no. December 2017. – P. 477–486. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.02.008

25. Hsiao, H.M. Strain Rate Effects on the Transverse Compressive and Shear Behavior of Unidirectional Composites / H.M. Hsiao, I.M. Daniel, R.D. Cordes // Journal of Composite Materials. – 1999. – Vol. 33, no. 17. – P. 1620–1642.

26. Duan, S. Experimental study on strain-rate-dependent behavior and failure modes of long glass fiber-reinforced polypropylene composite / S. Duan, X. Yang, Y. Tao // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2015. – Vol. 34, no. 15. – P. 1261–1270.

27. Kolsky, H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading / H. Kolsky // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1949. – Vol. 62, no. 11.

28. Gama, B.A. Hopkinson bar experimental technique: A critical review / B.A. Gama, S.L. Lopatnikov, J.W. Gillespie // Applied Mechanics Reviews. – 2004. – Vol. 57, no. 4. – P. 223–250.

29. Matthews, F.L. Compression / F.L. Matthews // Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. – Woodhead Publishing, 2000. – P. 75–99.

30. Mostapha, T. Experimental Investigation of Dynamic Compression and Damage Kinetics of Glass/Epoxy Laminated Composites under High Strain Rate Compression [Электронный ресурс] / T. Mostapha // Advances in Composite Materials – Ecodesign and Analysis. – InTech, 2011. – URL: https://www.intechopen.com/state.item.id (дата обращения: 06.10.2022).

31. Kuhn, P. Characterization of unidirectional carbon fiber reinforced polyamide-6 thermoplastic composite under longitudinal compression loading at high strain rate [Электронный ресурс] / P. Kuhn, M. Ploeckl, H. Koerber. – 2015. – Vol. 94. – P. 1041. – URL: https://www.researchgate.net/publication/281743559 (дата обращения: 16.02.2023).

32. A dynamic test methodology for analyzing the strain-rate effect on the longitudinal compressive behavior of fiber-reinforced composites / M. Ploeckl, P. Kuhn, J. Grosser [et al.] // Composite Structures. – 2017. – Vol. 180. – P. 429–438. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.048

33. Lee, J. A study on the compressive strength of thick carbon fibre–epoxy laminates / J. Lee, C. Soutis // Composites Science and Technology. – 2007. – Vol. 67, no. 10. – P. 2015–2026.

34. Strain-Rate Dependency of a Unidirectional Filament Wound Composite under Compression / S. Konev, V.A. Eremeyev, H.M. Sedighi [et al.] // Computer Modeling in Engineering & Sciences. – 2023. – Vol. 137, no. 3. – P. 2149–2161.

35. Staab, G.H. High Strain Rate Response of Angle-Ply Glass/Epoxy Laminates / G.H. Staab, A. Gilat // Journal of Composite Materials. – 1995. – Vol. 29, no. 10. – P. 1308–1320.

36. The strain rate dependent material behavior of S-GFRP extracted from GLARE / R. Gerlach, C.R. Siviour, J. Wiegand, N. Petrinic // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2013. – Vol. 20, no. 7. – P. 505–514.

37. Taniguchi, N. Tensile strength of unidirectional CFRP laminate under high strain rate / N. Taniguchi, T. Nishiwaki, H. Kawada // Advanced Composite Materials: The Official Journal of the Japan Society of Composite Materials. – 2007. – Vol. 16, no. 2. – P. 167–180.

38. Daniel, I.M. New method for testing composites at very high strain rates / I.M. Daniel, R.H. LaBedz, T. Liber // Experimental Mechanics. – 1981. – Vol. 21, no. 2. – P. 71–77.

39. Филиппов, А.Р. Методика динамических испытаний высокопрочных композитов на растяжение / А.Р. Филиппов // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Vol. 86, no. 1. – P. 106–119.

40. Harding, J. A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain / J. Harding, L.M. Welsh // Journal of Materials Science. – 1983. – Vol. 18, no. 6. – P. 1810–1826.

41. Exploding wire method for the characterization of dynamic tensile strength of composite materials / A. Fedorenko, Y. Sudenkov, S. Konev, I. Sergeichev // International Journal of Impact Engineering. – 2023. – Vol. 180, no. June. – P. 104704.

42. Elamin, M. Plate impact method for shock physics testing / M. Elamin, J. Varga // Material Science & Engineering International Journal. – 2020. – Vol. 4, no. 1.

43. Брагов, А.М. Установка для исследования механических свойств твердых тел при ударном нагружении / О.Л.К. Брагов А.М., Г.М. Грушевский // Заводская лаборатория. – 1991. – Vol. 7. – P. 50–51.

44. Shear properties of epoxy under high strain rate loading / N.K. Naik, R. Gadipatri, N.M. Thoram [et al.] // Polymer Engineering & Science. – 2010. – Vol. 50, no. 4. – P. 780–788.

45. Lewis, J.L. The development and use of a torsional Hopkinson-bar apparatus / J.L. Lewis, J.D. Campbell // Experimental Mechanics. – 1972. – Vol. 12, no. 11. – P. 520–524.

46. Gilat, A. Torsional split Hopkinson bar tests at strain rates above 104 s-1 / A. Gilat, C.S. Cheng // Experimental Mechanics. – 2000. – Vol. 40, no. 1. – P. 54–59.

47. Dong, L. A single-lap shear specimen for determining the effect of strain rate on the interlaminar shear strength of carbon fibre-reinforced laminates / L. Dong, J. Harding // Composites. – 1994. – Vol. 25, no. 2. – P. 129–138.

48. Bouette, B. Effect of strain rate on interlaminar shear properties of carbon/epoxy composites / B. Bouette, C. Cazeneuve, C. Oytana // Composites Science and Technology. – 1992. – Vol. 45, no. 4. – P. 313–321.

49. Hsiao, H.M. Dynamic compressive behavior of thick composite materials / H.M. Hsiao, I.M. Daniel, R.D. Cordes // Experimental Mechanics. – 1998. – Vol. 38, no. 3. – P. 172–180.

50. Kidane, A. Strain Rate Effects in Polymer Matrix Composites Under Shear Loading: A Critical Review / A. Kidane, H.L. Gowtham, N.K. Naik // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2017. – Vol. 3, no. 1. – P. 110–132.

51. Werner, S.M. The Dynamic Response of Graphite Fiber-Epoxy Laminates at High Shear Strain Rates / S.M. Werner, C.K.H. Dharan // Journal of Composite Materials. – 1986. – Vol. 20, no. 4. – P. 365–374.

52. Development and Application of Dynamic Integrated DIC Material Parameters Inversion Method for SHPB Tests / S. Cai, J. Zhao, Z. Liu, Y. Fu // Experimental Mechanics. – 2024. – Vol. 64, no. 7. – P. 995–1003.

53. Experimental Learning of a Hyperelastic Behavior with a Physics-Augmented Neural Network / C. Jailin, A. Benady, R. Legroux, E. Baranger // Experimental Mechanics. – 2024. – Vol. 64, no. 9. – P. 1465–1481.

References

1. Chambe J.E., Dorival O., Bouvet C., Ferrero J.F. Crushing of composite tubular structures and energy absorption for aircraft seats development. *ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials*, 2020.

2. Ren Y., Zhang H., Xiang J. A novel aircraft energy absorption strut system with corrugated composite plate to improve crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 2018, vol. 23, no 1, pp. 1-10.

3. Chen P.W., Lin Y.Y. Evaluation on crashworthiness and energy absorption of composite light airplane. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, no. 8, pp. 1-12.

4. Zhu G., Sun G., Yu H. et al. Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 135, pp. 458-483.

5. Jacob G.C., Fellers J.F., Starbuck J.M., Simunovic S. Crashworthiness of automotive composite material systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, vol. 92, no. 5, pp. 3218-3225.

6. Farhood N.H., Karuppanan S., Ya H.H., Abdul-Lateef W.E. A comparative study of impact effect of composite cylinders and type IV pressure vessels. *Emerging Materials Research*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 206-217.

7. Scazzosi R., Giglio M., Manes A. Numerical simulation of high-velocity impact on fiber-reinforced composites using MAT_162. *Material Design and Processing Communications*, 2021, vol. 3, no. 3.

8. Mousavi M.V., Khoramishad H. Investigation of energy absorption in hybridized fiber-reinforced polymer composites under high-velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, vol. 146, 103692 p.

9. Deb A. Crashworthiness design issues for lightweight vehicles. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. Elsevier, 2021, pp. 433-470.

10. Nurul Fazita M.R.R., Abdul Khalil H.P.S.P.S., Nor Amira Izzati A., Rizal S. Effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption in polymer composites. *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Elsevier, 2019, pp. 51-78, available at: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008102293100003 6 (accessed 08 April 2023).

11. Ismail A.E., Kamarudin K.-A. Modeling of crushing mechanisms of hybrid metal/fiber composite cylindrical tubes. *Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Elsevier, 2019, pp. 27-39.

12. Ahmad B., Fang X. Strain rate-dependent crash simulation of woven glass fabric thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2022, vol. 41, no. 15-16, pp. 637-658.

13. Bhujangrao T., Froustey C., Iriondo E. et al. Review of Intermediate Strain Rate Testing Devices. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 7, 894 p.

14. Thomson D.M. Physically-based meso-scale modelling of unidirectional CFRPs for impact loading applications. PhD Thesis, 2019.

15. Ren Q., Zhang Y., Hu L. et al. Achieving synchronous compression-shear loading on SHPB by utilizing mechanical metamaterial. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, vol. 186, 104888 p.

16. Perry J.I., Walley S.M. Measuring the Effect of Strain Rate on Deformation and Damage in Fibre-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 178-213, available at: https://doi.org/10.1007/s40870-022-00331-0 (accessed 29 November 2022).

17. Davies E.D.H., Hunter S.C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, vol. 11, no. 3.

18. George T. (Rusty) Gray I. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing. *Mechanical Testing and Evaluation*. Ohio: ASM International, 2000, pp. 462-476.

19. Zhou J., Pellegrino A., Heisserer U. et al. A new technique for tensile testing of engineering materials and composites at high strain rates. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, vol. 475, no. 2229, 20190310 p.

20. Van Blitterswyk J., Fletcher L., Pierron F. High-Strain Rate Interlaminar Shear Testing of Fibre-Reinforced Composites Using an Image-Based Inertial Impact Test. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2019. vol. 1, pp. 279-281.

21. Fletcher L., Van Blitterswyk J., Pierron F. A Novel Image-Based Inertial Impact Test (IBII) for the Transverse Properties of Composites at High Strain Rates. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 65-92.

22. Van Blitterswyk J., Fletcher L., Pierron F. Characterisation of the Interlaminar Properties of Composites at High Strain Rates: A Review. *Advanced Experimental Mechanics*, 2017, vol. 2, pp. 3-28.

23. Van Blitterswyk J., Fletcher L., Pierron F. Image-Based Inertial Impact Test for Composite Interlaminar Tensile Properties. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 543-572.

24. Spronk S.W.F., Verboven E., Gilabert F.A. et al. Stress-strain synchronization for high strain rate tests on brittle composites. *Polymer Testing*, 2018, vol. 67, no. December 2017, pp. 477-486, available at: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.02.008 (accessed 21 April 2023).

25. Hsiao H.M., Daniel I.M., Cordes R.D. Strain Rate Effects on the Transverse Compressive and Shear Behavior of Unidirectional Composites. *Journal of Composite Materials*, 1999, vol. 33, no. 17, pp. 1620-1642.

26. Duan S., Yang X., Tao Y. Experimental study on strain-rate-dependent behavior and failure modes of long glass fiber-reinforced polypropylene composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, vol. 34, no. 15, pp. 1261-1270.

27. Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1949, vol. 62, no. 11.

28. Gama B.A., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W. Hopkinson bar experimental technique: A critical review. *Applied Mechanics Reviews*, 2004, vol. 57, no. 4, pp. 223-250.

29. Matthews F. L. Compression. *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites*. Woodhead Publishing, 2000, pp. 75-99, available at: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781855733121500093 (accessed 06 September 2024).

30. Mostapha T. Experimental Investigation of Dynamic Compression and Damage Kinetics of Glass/Epoxy Laminated Composites under High Strain Rate Compression. *Advances in Composite Materials - Ecodesign and Analysis*. InTech, 2011, available at: https://www.intechopen.com/state.item.id (accessed 06 Oktober 2022).

31. Kuhn P., Ploeckl M., Koerber H. Characterization of unidirectional carbon fiber reinforced polyamide-6 thermoplastic composite under longitudinal compression loading at high strain rate, 2015, vol. 94, 1041 p., available at: https://www.researchgate.net/publication/281743559 (accessed 16 February 2023).

32. Ploeckl M., Kuhn P., Grosser J. et al. A dynamic test methodology for analyzing the strain-rate effect on the longitudinal compressive behavior of fiber-reinforced composites. *Composite Structures*, 2017, vol. 180, pp. 429-438, available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.048 (accessed 10 April 2023).

33. Lee J., Soutis C. A study on the compressive strength of thick carbon fibre-epoxy laminates. *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, no. 10, pp. 2015-2026.

34. Konev S., Eremeyev V.A., Sedighi H.M. et al. Strain-Rate Dependency of a Unidirectional Filament Wound Composite under Compression. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2023, vol. 137, no. 3, pp. 2149-2161, available at: http://dodssp.daps.dla.mil (accessed 29 April 2023).

35. Staab G.H., Gilat A. High Strain Rate Response of Angle-Ply Glass/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials*, 1995, vol. 29, no. 10, pp. 1308-1320.

36. Gerlach R., Siviour C.R., Wiegand J., Petrinic N. The strain rate dependent material behavior of S-GFRP extracted from GLARE. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2013, vol. 20, no. 7, pp. 505-514.

37. Taniguchi N., Nishiwaki T., Kawada H. Tensile strength of unidirectional CFRP laminate under high strain rate. *Advanced Composite Materials: The Official Journal of the Japan Society of Composite Materials*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 167-180, available at: https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tacm20 (accessed 09 April 2023).

38. Daniel I.M., LaBedz R.H., Liber T. New method for testing composites at very high strain rates. *Experimental Mechanics*, 1981, vol. 21, no. 2, pp. 71-77.

39. Filippov A.R. Metodika dinamicheskikh ispytanii vysokoprochnykh kompozitov na rastiazhenie [Dynamic tensile testing of high-strength composites]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2024, vol. 86, no. 1, pp. 106-119.

40. Harding J., Welsh L.M. A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain. *Journal of Materials Science*, 1983, vol. 18, no. 6, pp. 1810-1826, available at: https://link.springer.com/article/10.1007/BF00542078 (accessed 20 December 2022).

41. Fedorenko A., Sudenkov Y., Konev S., Sergeichev I. Exploding wire method for the characterization of dynamic tensile strength of composite materials. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, vol. 180, no. June, 104704 p.

42. Elamin M., Varga J. Plate impact method for shock physics testing. *Material Science & Engineering International Journal*, 2020, vol. 4, no. 1.

43. Bragov A.M., Grushevskii G.M., Olonov L.K. Ustanovka dlia issledovaniia mekhanicheskikh svoistv tverdykh tel pri udarnom nagruzhenii [Installation for the study of mechanical properties of solids under shock loading]. *Zavodskaia laboratoriia*, 1991, no. 7, pp. 50-51.

44. Naik N.K., Gadipatri R., Thoram N.M. et al. Shear properties of epoxy under high strain rate loadingю. *Polymer Engineering & Science*, 2010, vol. 50, no. 4, pp. 780-788.

45. Lewis J.L., Campbell J.D. The development and use of a torsional Hopkinson-bar apparatus. *Experimental Mechanics*, 1972, vol. 12, no. 11, pp. 520-524, available at: https://link.springer.com/article/10.1007/BF02320749 (accessed 20 April 2023).

46. Gilat A., C.S. Cheng Torsional split Hopkinson bar tests at strain rates above 104 s-1. *Experimental Mechanics*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 54-59.

47. Dong L., Harding J. A single-lap shear specimen for determining the effect of strain rate on the interlaminar shear strength of carbon fibre-reinforced laminates. *Composites*, 1994, vol. 25, no. 2, pp. 129-138.

48. Bouette B., Cazeneuve C., Oytana C. Effect of strain rate on interlaminar shear properties of carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 1992, vol. 45, no. 4, pp. 313-321.

49. Hsiao H.M., Daniel I.M., Cordes R.D. Dynamic compressive behavior of thick composite materials. *Experimental Mechanics*, 1998, vol. 38, no. 3, pp. 172-180.

50. Kidane A., Gowtham H.L., Naik N.K. Strain Rate Effects in Polymer Matrix Composites Under Shear Loading: A Critical Review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 110-132.

51. Werner S.M., Dharan C.K.H. The Dynamic Response of Graphite Fiber-Epoxy Laminates at High Shear Strain Rates. *Journal of Composite Materials*, 1986, vol. 20, no. 4, pp. 365-374.

52. Cai S., Zhao J., Liu Z., Fu Y. Development and Application of Dynamic Integrated DIC Material Parameters Inversion Method for SHPB Tests. *Experimental Mechanics*, 2024, vol. 64, no. 7, pp. 995-1003.

53. Jailin C., Benady A., Legroux R., Baranger E. Experimental Learning of a Hyperelastic Behavior with a Physics-Augmented Neural Network. *Experimental Mechanics*, 2024, vol. 64, no. 9, pp. 1465-1481.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00014, https://rscf.ru/project/24-21-00014/.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-21-00014, https://rscf.ru/project/24-21-00014/.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.