

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-106-119

МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ*

© 2024 г.

Филиппов А.Р.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

filippov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 21.12.2023

Предложена и апробирована экспериментальная методика определения прочности при высокоскоростном растяжении высокопрочных композитов, основанная на комбинации модифицированной методики Кольского при сжатии и методики расширяющегося под действием внутреннего давления тонкого кольца из испытуемого материала. Для создания импульсного внутреннего давления, вызывающего расширение и разрыв кольца, используется гидродинамическое нагружение в системе разрезного стержня Гопкинсона при сжатии. Для этого между торцами мерных стержней располагается герметичная полость с жидкостью, передающей сжимающее давление на внутреннюю поверхность кольца. В качестве среды, передающей импульс сжатия с мерных стержней на внутреннюю поверхность тонкостенного кольцевого образца, использовалось машинное масло. Опорный мерный стержень выполняет функцию динамометра, позволяющего на основании зарегистрированного в нем импульса деформации измерить амплитуду развиваемого в масле давления. Поскольку жидкость внутри кольца является практически несжимаемой, измеренное на основании прошедшего импульса напряжение, передаваемое в жидкость, равно развиваемому в ней давлению, которое вызывает осесимметричное расширение кольцевого образца с развиваемым тангенциальным напряжением в теле кольца, приводящим к разрыву высокопрочных армирующих волокон. Максимальное тангенциальное напряжение, которое соответствует максимуму зарегистрированного в опорном мерном стержне прошедшего импульса, можно считать искомым пределом прочности материала композитного кольца при растяжении.

Для оценки работоспособности предложенной методики использовались образцы в виде тонких колец из нескольких слоев углеродных волокон, пропитанных полимерным клеем. Проведены пробные испытания композиционного материала однонаправленного армирования растяжением в направлении волокна. В результате проведенных испытаний кольцевого образца на основании измерения величины прошедшего импульса в опорном мерном стержне получена зависимость от времени развития окружных напряжений в кольце. Максимальное значение тангенциальных напряжений в кольце, соответствующее пределу прочности углеродных волокон на растяжение,

* Выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект №FSWR 2023-0036).

составило примерно 2120 МПа. Скорость роста напряжений – 28000 ГПа/с. Совместное использование метода Кольского и метода расширяющегося кольца позволило получить характеристику прочности композиционного материала при растяжении.

Ключевые слова: метод Кольского, растяжение, кольцевой образец, диаграмма деформирования, прочность.

Введение

Несмотря на растущий интерес к динамическим свойствам высокопрочных волокон (кевларовых, углеродных волокон (УВ), стекловолокна, а также волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена), публикации о методах и процедурах динамических испытаний на растяжение собственно волокон и нитей немногочисленны из-за больших технических трудностей, связанных с необходимостью достаточно плотно удержания испытуемых образцов без создания чрезмерной концентрации напряжений на концах нитей, провоцирующей их преждевременный разрыв. Разработка экспериментальных методов, позволяющих получить достоверные характеристики прочности при растяжении высокопрочных нитей, началась более 60 лет назад. Методики изучения прочностных свойств высокопрочных волокон можно разделить на три группы испытаний: 1) элементарного волокна; 2) пучка волокон; 3) пучка волокон, пропитанных связующим. Обычно последний способ используют при испытании на растяжение УВ, используемых в углепластиках.

В статье [1] приведены результаты испытаний изотактических¹ высокопрочных полипропиленовых нитей с использованием семи различных видов устройств с применением: универсальной испытательной машины INSTRON, пневматического испытательного устройства, двух типов пневмогидравлических устройств, установки с падающим грузом, продольного вращающегося диска и баллистических методов. Были достигнуты скорости деформации от 0,003 до 334 с⁻¹. Получены сведения о предельных свойствах изотактической полипропиленовой нити, значения предела прочности на разрыв полипропилена увеличивались с ростом скорости деформации.

Для определения предела прочности элементарного волокна проводятся статические испытания элементарного волокна, которое с помощью клея закрепляют в бумажную рамку и устанавливают в зажимах испытательной машины [2]. Так как волокно, особенно высокомодульное, хрупкое, предъявляются жесткие требования к центровке волокна при испытании, чтобы предотвратить его разрушение в местах зажима.

Изучались эффекты от скорости деформации сверхпрочных полиэтиленовых волокон [3]. В экспериментах крученая нить из полиэтиленовых волокон подвергалась поперечному удару снарядом, летящим со скоростью 130 м/с. Высокоскоростная камера фиксировала процесс и позволяла измерять скорость поперечного фронта волны. Динамический модуль упругости, скорость продольной волны и напряжение в нити авторы определяли на основе теории поперечного удара по волокну, описанной в [4, 5]. Тем не менее авторы обнаружили, что оценки прочности, полученные при различных скоростях деформации, недостоверны из-за проблем, связанных с техникой зажима для удержания пучков волокон.

¹Изотактический полимер – полимер, в котором заместители расположены в пространстве по одну сторону от основной полимерной цепи. Стереорегулярность полимера определяет высокие прочностные свойства.

Для высокоскоростных испытаний на растяжение волокнистых материалов используется метод разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). Для испытаний на растяжение волокон из кевлара [6] и тварона [7] авторы применили аналогичные экспериментальные методики. Арамидная нить 3 была намотана на две одинаковые тонкие шпульки 2, которые были приклеены к поддерживающей плите 1 на некотором расстоянии L_s (рис. 1).

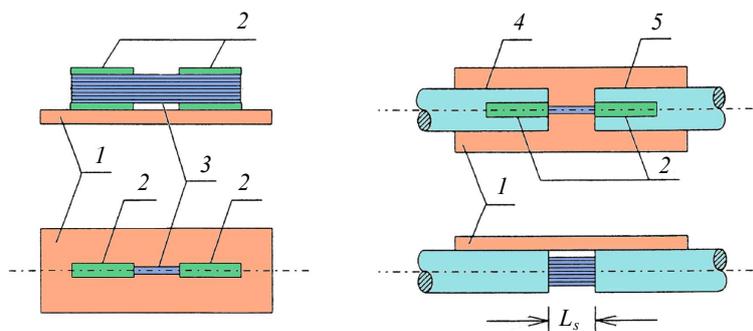


Рис. 1. Схема сборки для испытаний нитей на растяжение в системе РСГ

При изготовлении сборки нить с клеем закреплялась на первой шпулке, производилась параллельная намотка нити между шпулками (от четырех до двадцати витков), второй конец нити закреплялся клеем на второй шпулке. Затем сборка клеивалась в прорези на торцах мерных стержней – нагружающего 4 и опорного 5 с помощью клея с высокой прочностью на сдвиг. После этого поддерживающая пластина 1 удалялась и производилось нагружение сборки растягивающей нагрузкой в системе РСГ. Скорости деформации варьировались от 100 до 1000 с⁻¹. Было отмечено, что процедуры образования петель с последующим склеиванием требуют особого внимания для обеспечения надежных результатов. В статье [8] были представлены результаты испытаний на растяжение тканевых полос тварона шириной 5 мм и толщиной 0,4 мм с помощью оригинальных цанговых захватов для испытания в системе РСГ. Тварон – ткань, изготовленная из арамидных волокон и в чем-то похожая на широко известный кевлар, также часто используется в гибких защитных конструкциях, подвергающихся высокоскоростной нагрузке. Определено, что по мере увеличения скорости деформации от 0,01 до 550 с⁻¹ предел прочности при растяжении и модуль материала увеличиваются, а деформация разрушения уменьшается. Образцы также претерпевают переход от вязкого к хрупкому разрушению за некоторым порогом скорости деформации.

Известны также методы исследования прочности арамидных волокон с помощью баллистических установок. В [9] представлен оригинальный экспериментальный метод для получения динамической прочности арамидных нитей при растяжении. Метаемый в стволе газовой пушки ударник состоит из двух компонентов: снаряда и поддона, соединенных между собой с помощью уложенной внутри поддона исследуемой нити. На дульный срез пушки навинчивается отсекающий поддон, который заставляет поддон резко останавливаться, в то время как снаряд продолжает свободно двигаться, разматывая нить из поддона. Через несколько миллисекунд нить полностью разматывается, и к ней прикладывается импульсное растягивающее напряжение, в результате чего возникает сила сопротивления, которая замедляет снаряд. Если напряжение, пропорциональное скорости ударника, становится слишком большим, нить

рвется и снаряд летит дальше с меньшей остаточной скоростью. В другом случае, когда напряжение в нити не достигает ее предела прочности, нить не рвется и снаряд полностью останавливается. Высокоскоростная камера записывает процесс полета снаряда в процессе разрыва нити для оценки остаточной скорости. Узел крепления нити к снаряду и поддону остается слабым местом в методике, потому что он может вызывать концентрацию напряжения сдвига в нити и последующий ее разрыв ранее достижения предела напряжения растяжения.

Удар поперек волокна является альтернативным методом, который использует преимущества механизмов деформации с преобладанием волн, которые возникают в условиях высокой скорости, и может позволить сделать вывод о реакции материала в зависимости от скорости ударника. Методика предусматривает выстрел снарядом в центр длинной нити и высокоскоростную кинорегистрацию последующего движения поперечной волны [10]. Поперечная волна легче визуализируется и изображается, чем продольная волна. Проблема закрепления образца не имеет особого значения, если используется достаточно длинный образец, поскольку интересующая деформация происходит до того, как какие-либо волны достигнут концов нити.

В случае испытаний на растяжение при высоких скоростях деформации некоторые авторы исследовали альтернативы методу разрезного стержня Гопкинсона, и многие из этих испытаний были основаны на измерении окружного напряжения в тонком кольцеобразном образце, подвергаемом осесимметричному растяжению импульсной нагрузкой. Под действием осесимметричного радиального давления в тонком кольце реализуются условия одноосного напряженного состояния. В настоящее время в экспериментальной практике известны три основных метода динамического расширения колец. Первый метод заключается в использовании взрывного нагружения [11–13], второй – в использовании электромагнитного воздействия [14–17], а третий – в использовании механического нагружения за счет осевого перемещения конического разжимного элемента, движущегося в результате воздействия ударника и вызывающего радиальное расширение исследуемого кольца [18]. Использование взрывного нагружения в лабораторных условиях сопряжено с большими организационными трудностями, механическое воздействие разжимного элемента очень трудно контролировать. Таким образом, на сегодняшний день основным экспериментальным методом, доступным для исследования расширения колец, является электромагнитное импульсное нагружение. Этот метод достаточно универсален, однако регистрация измеряемых параметров существенно затруднена наличием сильных электромагнитных наводок, к тому же прямое электромагнитное воздействие на кольцевой образец возможно только при испытаниях металлических образцов, а в случае испытаний полимерных или композиционных материалов необходимо наличие специального металлического кольца (лайнера) внутри испытываемого композитного кольца. Лайнер воспринимает электромагнитный импульс, осесимметрично расширяется в радиальном направлении и передает растягивающий импульс на испытываемое кольцо.

Метод расширяющегося кольца имеет две принципиально различные модификации: свободный разлет кольца в условиях инерционного замедления после кратковременно приложенного осесимметричного радиального импульса напряжения и расширение кольца при непрерывном контакте с вызывающим это расширение элементом (твердым телом или жидкостью). В первом случае при нагружении кольца очень коротким импульсом (при взрыве или разряде конденсаторов на индуктор)

методика построения диаграмм $\sigma \sim \varepsilon$ предусматривает рассмотрение свободного замедленного разлета кольца с начальной радиальной скоростью, приобретенной под действием импульса. Для тонкого кольца окружное напряжение σ_θ в соответствии со вторым законом Ньютона в отсутствие давления на его внутренней поверхности равно [11]:

$$\sigma_\theta(t) = -\rho R_0 \ddot{W}(t), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала кольца, R_0 – начальный радиус кольца, $\ddot{W}(t)$ – радиальное ускорение стенки кольца. Деформация в образце определяется по результатам измерений мгновенного диаметра или абсолютной радиальной деформации кольца $W(t)$:

$$\varepsilon_\theta(t) = \frac{W(t)}{R_0}. \quad (2)$$

Как видно из приведенных зависимостей, при свободной раздаче кольцевых образцов регистрируют только радиальную раздачу образца. Однако для вычисления напряжений требуется процедура двукратного дифференцирования полученной экспериментальной кривой $W(t)$, при которой может возникать существенная погрешность. В последнее время в технике расширяющегося кольца для более точного определения напряжения используют VISAR – лазерный измеритель скорости радиальной раздачи образца, поэтому для вычисления радиального ускорения требуется лишь однократное дифференцирование.

Во втором случае, когда скорость нарастания и длительность осесимметричного радиального воздействия значительны, расширение кольца происходит только за счет внутреннего давления, вызванного тем или иным фактором (например, взрывом проволоки или механическим импульсным нагружением полости с жидкостью, передающей давление на внутреннюю поверхность кольца) [19]:

$$\sigma_\theta(t) = p(t) \frac{R}{\delta}, \quad (3)$$

где $p(t)$ – импульсное давление на внутреннюю стенку кольца, R – радиус кольца, δ – толщина его стенки.

Вариант импульсного нагружения кольца давлением жидкости был описан в публикациях [20, 21], в которых изучалась динамическая реакция колец из монолитного полиметилметакрилата и однонаправленных композитов на основе ленты Dyneema, нитей Dyneema SK75 или нитей Kevlar 49. Этот метод обеспечивает раннее уравновешивание сил и дает достоверные кривые напряжения–деформации при растяжении, которые включают в себя часть упругого отклика материала. Испытуемый кольцевой образец располагается на наружной боковой поверхности специальной резиновой манжеты, заполненной несжимаемой жидкостью, которая нагружается импульсным осевым давлением, создаваемым в системе РСГ. В результате манжета расширяется в радиальном направлении и заставляет расширяться испытуемый кольцеобразный образец.

В настоящей статье предложено развитие этой методики исследования прочности углеродных волокон на растяжение путем нагружения импульсной радиальной нагрузкой тонкостенного кольца, образованного несколькими слоями намотанных углеродных нитей с полимерным связующим.

Экспериментальная методика

Для исследования динамической прочности углеродных волокон при растяжении была разработана оригинальная методика по нагружению кольцевых тонкостенных образцов внутренним импульсным давлением, создаваемым с помощью системы разрезного стержня Гопкинсона при сжатии. В качестве среды, передающей импульс сжатия с мерных стержней на внутреннюю поверхность кольцевого образца, использовалось машинное масло.

Для испытаний была применена установка РСГ [22] с мерными стержнями из сплава Д16Т диаметром 20 мм и длиной 1,5 м. Для разгона дюралевого ударника длиной 200 мм до скоростей 20–40 м/с использовалась газовая пушка калибра 20 мм. В результате удара в системе РСГ формировался упругий импульс сжатия длительностью до 150 мкс. Между торцами мерных стержней располагалась специальная сборка с испытуемым тонкостенным кольцеобразным образцом. Схема сборки показана на рис. 2.

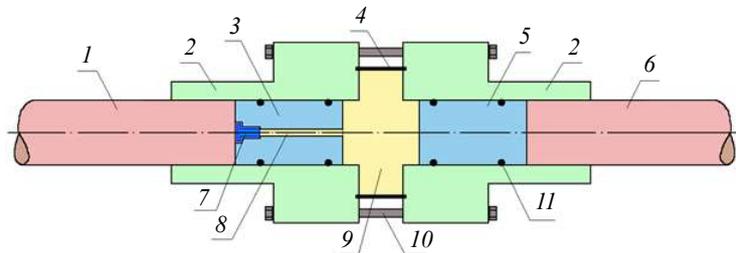


Рис. 2. Схема сборки с кольцеобразным образцом

Кольцеобразный образец 4 располагается в центрирующих и герметизирующих канавках глубиной 0,5 мм на торцах муфт 2, сжимаемых между собой четырьмя болтами 10. Внутри муфт 2 располагаются два поршня 3 и 5 с уплотнительными кольцами 11. Процесс подготовки сборки и заполнения внутренней полости жидкостью (маслом) состоит из следующих операций. Муфты 2 насаживаются на центрирующий их взаимное положение стержень, и между их торцами в кольцевые канавки аккуратно вставляется кольцевой испытуемый образец 4. Четыре скрепляющих сборку болта 10 равномерно стягивают сборку с образцом, обеспечивая соосное расположение образца и муфт между собой и их жесткое соединение, но без излишней затяжки, чтобы исключить осевое деформирование образца 4. Затем временное центрирующий стержень аккуратно извлекается из сборки, и в одну из муфт плавно вдавливаются сплошной поршень 5 с уплотнительными кольцами 11 до требуемого положения от торца муфты. Затем сборка устанавливается вертикально и в полость 9 заливается требуемое количество масла. Второй поршень 3 с открытым отверстием 8 плавно вдавливается внутрь муфты 3 до контакта с поверхностью масла, вытесняя воздушный пузырь и часть масла через канал 8. После этого канал 8 заглушается винтом 7 и производится измерение фактической длины полости с маслом между торцами поршней 3 и 5. Готовая сборка затем размещается между торцами мерных стержней 1 и 6. Внешний вид сборки с испытуемым образцом, установленной между торцами мерных стержней, показан на рис. 3.

В стволе газовой пушки разгоняется ударник, который наносит удар по торцу одного из мерных стержней (нагружающего), в результате чего в системе РСГ распространяется упругий импульс деформации, который достигает камеры 9 с маслом и

сжимает его. Поскольку масло является практически несжимаемым телом (в диапазоне амплитуд давлений, которые могут быть реализованы в эксперименте), оно передает импульс гидродинамического давления на внутреннюю поверхность испытуемого кольцеобразного образца 4, что вызывает его растяжение. Второй (опорный) мерный стержень выполняет функцию динамометра, позволяющего на основании зарегистрированного в нем импульса деформации измерить амплитуду развиваемого в масле давления.



Рис. 3. Внешний вид сборки для испытаний кольцевого образца

В процессе эксперимента в нагружающем мерном стержне распространяются падающий $\varepsilon^I(t)$ и отраженный $\varepsilon^R(t)$ импульсы деформации, а в опорном мерном стержне – прошедший импульс $\varepsilon^T(t)$. Для регистрации этих импульсов использовались малобазные (3 мм) фольговые тензорезисторы, наклеенные на боковую поверхность мерных стержней. По сигналам с тензорезисторов на обоих мерных стержнях по формулам метода Кольского [22] определяются процессы развития во времени напряжения $\sigma_s(t)$, продольной деформации $\varepsilon_s(t)$ и скорости деформации $\dot{\varepsilon}_s(t)$ в образце, роль которого в этом случае играет жидкость внутри кольцевого образца в полости между торцами поршней:

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s} \varepsilon^T(t), \quad (4)$$

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon^R(t) dt, \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C}{L_0} \varepsilon^R(t), \quad (6)$$

где E и A – соответственно модуль Юнга и площадь поперечного сечения стержней, A_s – площадь поперечного сечения образца (полости с жидкостью внутри кольца), C – скорость распространения упругих волн в мерных стержнях, L_0 – исходная длина образца (полости с жидкостью внутри кольца). Следует отметить, что поскольку жидкость внутри кольца передает импульс напряжения в опорный стержень (через поршень 3) всем своим сечением, то площади A и A_s в формуле (4) будут равны между собой.

Поскольку жидкость внутри кольца является практически несжимаемой, измеренное на основании прошедшего импульса и передаваемое в жидкость напряжение $\sigma_s(t)$ равно развиваемому в ней давлению $p(t)$, вызывающему осесимметричное расширение кольцевого образца с определяемым формулой (3) тангенциальным напряжением, приводящим к разрыву армирующих волокон. Подстановка (4) в (3)

позволяет вычислить процесс развития тангенциального напряжения в испытуемом кольце:

$$\sigma_{\theta}(t) = E\varepsilon^T(t) \frac{R}{\delta}. \quad (7)$$

Максимальное тангенциальное напряжение, которое соответствует максимуму импульса $\varepsilon^T(t)$, можно считать искомой прочностью материала композитного кольца при растяжении.

Образцы для испытаний

Ранее проводились динамические испытания тканых композитов из углеродных нитей с целью построения редуцированной модели тканого композита [23, 24]. Однако для полноценной модели тканого композита необходимы динамические исследования прочности собственно нитей на растяжение.

В настоящей статье для оценки работоспособности предложенной методики использовались образцы из углеродных нитей в виде тонких колец, которые изготавливались следующим образом. Металлический стержень диаметром 30 мм и длиной 50 см обматывался слоем фторопластовой пленки и затем на него наматывалась смоченная полимерным клеем углеродная нить виток к витку по всей длине стержня. Всего наматывалось несколько таких слоев. После полимеризации клея полученная армированная полимерная трубка снималась с металлического стержня и разрезалась алмазным диском на отдельные кольцеобразные образцы (рис. 4). Результирующие размеры образцов были следующие: внутренний диаметр 30 мм, толщина стенки 0,23 мм, ширина образца 10 мм.



Рис. 4. Образец для испытаний

Результаты испытаний

По описанной методике были проведены пробные испытания композиционного материала однонаправленного армирования. Растяжение проводилось в направлении волокна. В опытах для нагружения РСГ с установленной сборкой использовался стальной ударник длиной 300 мм, разгоняемый в стволе газовой пушки в диапазоне скоростей от 10 до 20 м/с. При скорости ударника 10 м/с величина осесимметричного давления на внутреннюю поверхность кольца была недостаточной для разрыва углеродных нитей, а при скорости ударника 20 м/с происходило разрушение кольца с разрывом нитей. Вид образца после такого испытания показан на рис. 5.



Рис. 5. Образец после испытания

Рисунок 6 иллюстрирует типичные зависимости от времени тензометрических сигналов в нагружающем и опорном мерных стержнях в описанном типе испытаний. На рис. 7 показаны эти же импульсы, синхронизированные во времени и используемые в расчетных формулах. Можно отметить, что в течение процесса нагружения суммарный импульс деформаций $\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t)$ в нагружающем стержне (без учета знака) и импульс $\varepsilon^T(t)$ в опорном мерном стержне практически одинаковы, что свидетельствует о равновесии сил на торцах образца (полости с маслом).

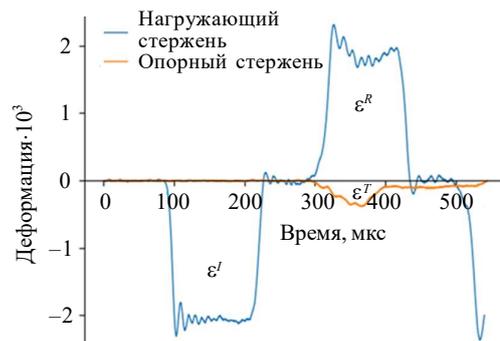


Рис. 6. Пример тензометрических сигналов с мерных стержней

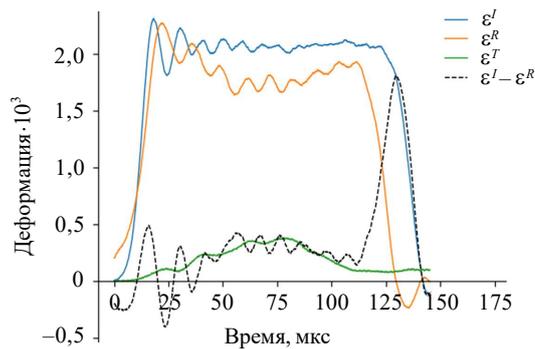


Рис. 7. Синхронизированные импульсы деформации с мерных стержней

Рисунок 8 иллюстрирует проверку условий равновесия сил (напряжений) на торцах образца (жидкости в полости между торцами поршней) в процессе испытания. Можно отметить, что до максимального значения силы условие равновесия напряжений выполняется.

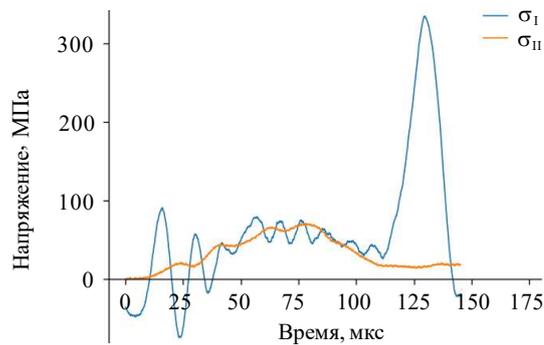


Рис. 8. Проверка условий равновесия напряжений на торцах образца

Зависимость развития полученных по формуле (7) окружных напряжений от времени в образце показана на рис. 9. Точкой *A* отмечен максимум зависимости тангенциального напряжения $\sigma_{\theta}(t)$, с которого начинается процесс разрушения композитного материала. Максимальное значение тангенциальных напряжений в кольце составило примерно 2120 МПа. Скорость роста напряжения при этом составит 28000 ГПа/с. При модуле упругости углеродных нитей вдоль волокон, равном 125 ГПа, скорость деформации в испытании ориентировочно равна 220 с^{-1} .

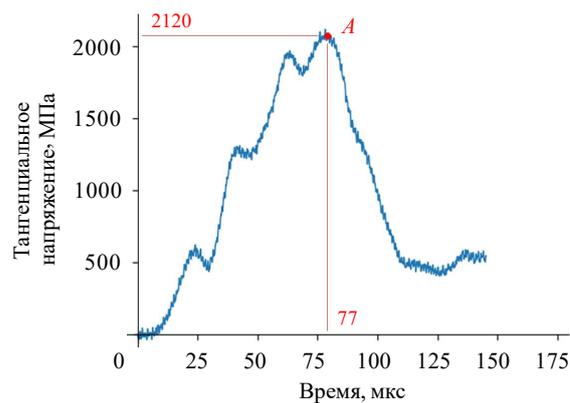


Рис. 9. Зависимость от времени окружных напряжений в образце

Наблюдаемые на нагружающем участке диаграммы колебания могут быть вызваны волновыми процессами в полости с жидкостью переменного поперечного сечения между торцами мерных стержней, возникающими при импульсном сжимающем нагружении.

Заключение

Испытания на растяжение образцов однонаправленного композита для определения предела прочности при растяжении имеют большие технические трудности (и при статических, и при динамических испытаниях), связанные с необходимостью плотного удержания лопаточных частей испытуемых образцов в захватах нагружающей машины, чтобы обеспечить разрушение в рабочей зоне образца, а не в лопаточных частях из-за более низкой прочности композитов на сдвиг. Предложен, реализован и апробирован новый метод измерения предела прочности на растяжение однонаправленного композита

на основании высокопрочных углеродных волокон. В методе реализовано совместное использование метода Кольского и метода расширяющегося кольца, которое позволило получить предел прочности при растяжении высокопрочных однонаправленных композиционных материалов. Найденный предел прочности при растяжении однонаправленного слоистого композита на основе углеволокна хорошо согласуется с аналогичными результатами, полученными другими методами.

Список литературы

1. Laible R.C., Morgan H.M. The viscoelastic behavior of isotactic polypropylene fibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 1962. Vol. 6. Iss. 21. P. 269–77. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070062104>.
2. ГОСТ 32667-2014 Волокно углеродное. Определение свойств при растяжении элементарной нити. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.
3. Prevorsek D.C., Chin H.B., Kwon Y.D., Field J.E. Strain rate effects in ultrastrong polyethylene fibers and composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 1991. Vol. 47. P. 45–66. DOI: 10.1002/APP.1991.070470004.
4. Smith J.C., McCrackin F.L., Scniefer H.F. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading: Part 5. Wave propagation in long textile yarns impacted transversely. *Textile Research Journal*. 1958. Vol. 28. Iss. 4. P. 288–302. <https://doi.org/10.1177/004051755802800402>.
5. Smith J.C., McCrackin F.L., Scniefer H.F. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading: Part 6. Velocities of strain waves resulting from impact. *Textile Research Journal*. 1960. Vol. 30. Iss. 10. P. 752–760. <https://doi.org/10.1177/004051756003001002>.
6. Wang Y., Xia Y. The effects of strain rate on the mechanical behaviour of Kevlar fiber bundles: an experimental and theoretical study. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1998. Vol. 29. Iss. 11. P. 1411–1415. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00038-4).
7. Gu B. Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile. *Composites Part B: Engineering*. 2003. Vol. 34. Iss. 4. P. 361–371. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00137-3).
8. Shim V.P.W., Lim C.T., Foo K.J. Dynamic mechanical properties of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*. 2001. Vol. 25. Iss. 1. P. 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00038-5).
9. Nussbaum J., Faderl N., Nuesing R., Ha-Minh C., Boussu F. Development of a new method to determine dynamic tensile strength of ballistic yarns. *EPJ Web of Conferences*. 2012. Vol. 26. Article No 01053. DOI: 10.1051/epjconf/20122601053.
10. Drodge D.R., Mortimer B., Holland C., Siviour C.R. Ballistic impact to access the high-rate behaviour of individual silk fibres. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2012. Vol. 60. Iss. 10. P. 1710–1721. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2012.06.007>.
11. Hoggatt C.R., Recht R.F. Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring. *Experimental Mechanics*. 1969. Vol. 9. P. 441–448. <https://doi.org/10.1007/BF02410405>.
12. Warnes R.H., Karpp R.R., Follansbee P.S. The freely expanding ring test—a test to determine material strength at high strain rates. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1986. Vol. 108. Iss. 4. P. 335–339. <https://doi.org/10.1115/1.3225891>.
13. Al-Maliky N.S., Parry D.J. Measurements of high strain rate properties of polymers using an expanding ring method. *Journal de Physique IV (Proceeding)*. 1994. Vol. 4. Iss. C8. P. C8-71 – C8-76. DOI: 10.1051/jp4:1994810.
14. Zhang H., Ravi-Chandar K. On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O. *International Journal of Fracture*. 2006. Vol. 142. P. 183–217. DOI: 10.1007/s10704-006-9024-7.
15. Dan J., Guo Z., Chen Y., Li Y., Zhang Z., Wei B., Liu M., Chen Y., Tang T. Preliminary investigations on dynamic fracture of ductile metals by using electromagnetically driven expanding ring. *AIP Advances*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. Article No 105001-1 – 105001-10. DOI: 10.1063/5.0016527.

16. Al-Maliky N.S., Parry D.J. A freely expanding ring technique for measuring the tensile properties of polymers. *Measurement Science and Technology*. 1996. Vol. 7. Iss. 5. P. 746–752. DOI: 10.1088/0957-0233/7/5/004.
17. Zhou J., Tagarielli V.L. On the development of new test techniques to measure the tensile response of materials at high and ultra-high strain rates. *Experimental Mechanics*. 2022. Vol. 62. P. 151–164. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00766-x>.
18. А.С. №832413 СССР. Способ испытания кольцевых образцов на вязкость разрушения. Г.В. Степанов, В.А. Маковой. Заяв. 07.06.1979. Опубл. 23.05.1981. БИ №19. 3 с.
19. Кокошвили С.М. Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978. 182 с.
20. Zhou J., Tagarielli V.L. On the development of new test techniques to measure the tensile response of materials at high and ultra-high strain rates. *Experimental Mechanics*. 2022. Vol. 62. P. 151–164. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00766-x>.
21. Zhou J., Heisserer U., Duke P.W., Curtis P.T., Morton J., Tagarielli V.L. The sensitivity of the tensile properties of PMMA, Kevlar® and Dyneema® to temperature and strain rate. *Polymer*. 2021. Vol. 225. Article No 123781. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123781>.
22. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.
23. Моссаковский П.А., Антонов Ф.К., Белякова Т.А., Костырева Л.А., Брагов А.М., Баландин В.В. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканых композитов в условиях ударного нагружения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Вып. 76. Ч. 1. С. 39–45. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2014-76-1-39-45>.
24. Моссаковский П.А., Баландин В.В., Беляев А.П., Белякова Т.А., Брагов А.М., Инюхин А.В., Костырева Л.А. Исследование диссипативных факторов при пробивании многослойных тканых преград. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. №4. С. 385–392. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-4-385-392>.

References

1. Laible R.C., Morgan H.M. The viscoelastic behavior of isotactic polypropylene fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 1962. Vol. 6. Iss. 21. P. 269–77. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070062104>.
2. GOST 32667-2014. Волокно углеродное. Определение свойств при растяжении элементарной нити [GOST 32667-2014. Carbon Fibre. Determination Filament's Tensile Properties]. Moscow. StandartInform Publ. 22 p. 2014. (In Russian).
3. Prevorsek D.C., Chin H.B., Kwon Y.D., Field J.E. Strain rate effects in ultrastrong polyethylene fibers and composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1991. Vol. 47. P. 45–66. DOI: 10.1002/APP.1991.070470004.
4. Smith J.C., McCrackin F.L., Scniefer H.F. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading: Part 5. Wave propagation in long textile yarns impacted transversely. *Text. Res. J.* 1958. Vol. 28. Iss. 4. P. 288–302. <https://doi.org/10.1177/004051755802800402>.
5. Smith J.C., McCrackin F.L., Scniefer H.F. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading: Part 6. Velocities of strain waves resulting from impact. *Text. Res. J.* 1960. Vol. 30. Iss. 10. P. 752–760. <https://doi.org/10.1177/004051756003001002>.
6. Wang Y., Xia Y. The effects of strain rate on the mechanical behaviour of Kevlar fiber bundles: an experimental and theoretical study. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 1998. Vol. 29. Iss. 11. P. 1411–1415. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00038-4).
7. Gu B. Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile. *Compos. B. Eng.* 2003. Vol. 34. Iss. 4. P. 361–371. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00137-3).
8. Shim V.P.W., Lim C.T., Foo K.J. Dynamic mechanical properties of fabric armor. *Int. J. Impact Eng.* 2001. Vol. 25. Iss. 1. P. 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00038-5).
9. Nussbaum J., Faderl N., Nuesing R., Ha-Minh C., Boussu F. Development of a new method to determine dynamic tensile strength of ballistic yarns. *EPJ Web of Conf.* 2012. Vol. 26. Article No 01053. DOI: 10.1051/epjconf/20122601053.

10. Drodge D.R., Mortimer B., Holland C., Siviour C.R. Ballistic impact to access the high-rate behaviour of individual silk fibres. *J. Mech. Phys. Solids*. 2012. Vol. 60. Iss. 10. P. 1710–1721. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2012.06.007>.
11. Hoggatt C.R., Recht R.F. Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring. *Exp. Mech.* 1969. Vol. 9. P. 441–448. <https://doi.org/10.1007/BF02410405>.
12. Warnes R.H., Karpp R.R., Follansbee P.S. The freely expanding ring test—a test to determine material strength at high strain rates. *J. Eng. Mater. Technol.* 1986. Vol. 108. Iss. 4. P. 335–339. <https://doi.org/10.1115/1.3225891>.
13. Al-Maliky N.S., Parry D.J. Measurements of high strain rate properties of polymers using an expanding ring method. *Journal de Physique IV (Proceeding)*. 1994. Vol. 4. Iss. C8. P. C8-71 – C8-76. DOI: 10.1051/jp4:1994810.
14. Zhang H., Ravi-Chandar K. On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O. *Int. J. Fract.* 2006. Vol. 142. P. 183–217. DOI: 10.1007/s10704-006-9024-7.
15. Dan J., Guo Z., Chen Y., Li Y., Zhang Z., Wei B., Liu M., Chen Y., Tang T. Preliminary investigations on dynamic fracture of ductile metals by using electromagnetically driven expanding ring. *AIP Advances*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. Article No 105001-1 – 105001-10. DOI: 10.1063/5.0016527.
16. Al-Maliky N.S., Parry D.J. A freely expanding ring technique for measuring the tensile properties of polymers. *Meas. Sci. Technol.* 1996. Vol. 7. Iss. 5. P. 746–752. DOI: 10.1088/0957-0233/7/5/004.
17. Zhou J., Tagarielli V.L. On the development of new test techniques to measure the tensile response of materials at high and ultra-high strain rates. *Exp. Mech.* 2022. Vol. 62. P. 151–164. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00766-x>.
18. A.S. №832413 SSSR. *Sposob ispytaniya koltsevykh obraztsov na vyazkost razrushe-niya* [A.S. No 832413 SSSR. *The Method of Testing Annular Samples for Fracture Toughness*]. G.V. Stepanov, V.A. Makovey. Zayavleno 07.06.1979 [Stated 1979.07.06]. Opublikovano 23.05.1981 [Published 1981.05.23]. BI №19 [Bulletin No 19]. 3 p. (In Russian).
19. Kokoshvili S.M. *Metody dinamicheskikh ispytaniy zhestkikh polimernykh materialov* [Methods of Dynamic Testing of Hard Polymer Materials]. Riga. Zinatne Publ. 1978. 182 p. (In Russian).
20. Zhou J., Tagarielli V.L. On the development of new test techniques to measure the tensile response of materials at high and ultra-high strain rates. *Exp. Mech.* 2022. Vol. 62. P. 151–164. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00766-x>.
21. Zhou J., Heisserer U., Duke P.W., Curtis P.T., Morton J., Tagarielli V.L. The sensitivity of the tensile properties of PMMA, Kevlar® and Dyneema® to temperature and strain rate. *Polymer*. 2021. Vol. 225. Article No 123781. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123781>.
22. Bragov A.M., Lomunov A.K. *Ispolzovanie metoda Kolskogo dlya issledovaniya protsessov vysokoskorostnogo deformirovaniya materialov razlichnoy fizicheskoy prirody* [Using the Kolsky method to Study the Processes of High-Speed Deformation of Materials of Various Physical Natures]. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2017. 148 p. (In Russian).
23. Mossakovskiy P.A., Antonov F.K., Belyakova T.A., Kostyreva L.A., Bragov A.M., Balandin V.V. Eksperimentalnoe issledovanie i konechno-elementnyy analiz tkanykh kompozitov v usloviyakh udarnogo nagruzheniya [The experimental investigation and FE-analysis of woven composites under impact loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2014. Iss. 76. Pt. 1. P. 39–45 (In Russian).
24. Mossakovskiy P.A., Balandin V.V., Belyaev A.P., Belyakova T.A., Bragov A.M., Inyukhin A.V., Kostyreva L.A. Issledovanie dissipativnykh faktorov pri probivaniii mnogosloynnykh tkanykh pregrad [Investigation of dissipative factors in puncturing multi-layered woven obstacles]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2015. Vol. 77. No 4. P. 385–392 (In Russian).

METHOD OF DYNAMIC TENSILE TESTING OF HIGH STRENGTH FIBERS*

Filippov A.R.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

filippov@mech.unn.ru

Received by the Editor 2023/12/21

The work proposes and tests an experimental method for determining the high-speed tensile strength of high-strength fibers, based on a combination of the modified Kolsky compression method and the method of a thin ring made of the test material expanding under internal pressure. To create a pulsed internal pressure that causes expansion of the ring, accompanied by stretching and rupture of its constituent material, hydrodynamic loading is used in a split Hopkinson bar system under compression. To do this, between the ends of the measuring bars there is a sealed cavity with a liquid that transmits compressive pressure to the inner surface of the ring. Machine oil was used as a medium transmitting the compression impulse from the measuring rods to the inner surface of the thin-walled annular sample. The transmitting pressure bar performs the function of a dynamometer, which allows, based on the deformation pulse registered in it, to measure the amplitude of the pressure developed in the oil. Since the liquid inside the ring is practically incompressible, the measured stress transmitted into the liquid based on the transmitted pulse is equal to the pressure developed in it, which causes an axisymmetric expansion of the annular sample with the development of tangential stress in the body of the ring, leading to the rupture of high-strength reinforcing fibers. The maximum tangential stress, which corresponds to the maximum of the transmitted pulse recorded in the transmitting pressure bar, can be considered the required tensile strength of the composite ring material.

To evaluate the performance of the proposed technique, samples in the form of thin rings made of four layers of carbon fibers impregnated with polymer glue were used. Trial tests of a composite material with unidirectional reinforcement were carried out. The stretching was carried out in the direction of the fiber. As a result of the tests of the ring sample, based on the transmitted pulse in the transmitting pressure bar, the time dependence of the development of circumferential stresses in the ring was obtained. The maximum value of tangential stresses in the ring, corresponding to the tensile strength of the carbon fibers, was approximately 2120 MPa. The rate of stress growth in this case is 35000 GPa/s. The combined use of the Kolsky method and the expanding ring method made it possible to obtain a characteristic of the tensile strength of the composite material.

Keywords: Kolsky method, tension, ring specimen, deformation diagram, strength.

*This research was supported by financial support from the State assignment Ministry of Education and Science of Russia (project No FSWR-2023-0036).