

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-104-118

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ МЕЖСЛОЙНОМ СДВИГЕ\*

© 2022 г.

**Басалин А.В.**

*Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

a-basalin@mail.ru

*Поступила в редакцию 03.01.2022*

Для определения механических характеристик в условиях интенсивных динамических воздействий полимерных композиционных материалов при межслоевом сдвиге предложены и апробированы три экспериментальные схемы: динамический трехточечный изгиб короткой балки, динамическое сжатие образцов-пластин с надрезами и динамическое выдавливание средней части образцов в виде параллелепипедов. Для создания ударных нагрузок и регистрации отклика образцов используется техника мерных стержней. Расчет усилий и смещений производится по формулам Кольского по данным тензометрических измерений. С использованием численного моделирования проверено одно из принципиальных допущений и условий применимости метода Кольского для определения характеристик материалов в эксперименте на динамический изгиб короткой балки, а именно условие динамического равновесия образца в процессе нагружения. Апробация схем проводилась на образцах из слоистого композиционного материала с полимерной матрицей, армированного углетканью. Приводится сравнительный анализ данных, полученных с применением трех разных схем испытаний. Отмечается, что данные, полученные методом выдавливания, хорошо согласуются с данными, определенными при динамическом сжатии образцов с надрезами. Характеристика прочности, определенная методом изгиба короткой балки, оказалась заметно выше. Получено, что определенные в динамическом диапазоне значения межслойной сдвиговой прочности в среднем на 25% ниже статической характеристики. Из трех схем наиболее предпочтительной является схема на выдавливание средней части образца-параллелепипеда, так как в отличие от изгиба балки она позволяет варьировать и контролировать условия нагружения, а в отличие от испытания надрезанных образцов симметрична, что исключает появление в образце изгибающих моментов.

*Ключевые слова:* скорость деформации, мерный стержень, слоистые полимерные композиционные материалы, эксперимент, углеволокно, расслоение, межслойный сдвиг.

---

\*Теоретические исследования выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (проект №0729-2020-0054). Экспериментальные исследования проводились при частичной финансовой поддержке РНФ (грант №21-19-00283).

## Введение

Многослойные композиционные материалы на основе стекло- или углеволокна и пластического связующего – полимерные композиционные материалы (ПКМ) – в настоящее время широко используются во многих отраслях промышленности. В частности, неуклонно растет доля ПКМ в конструкции магистральных самолетов. Их применение обусловлено высокой прочностью при относительно малой плотности, термостойкостью и другими улучшенными механическими свойствами. Как правило, реология композиционных материалов (КМ) очень сложна. Подобные материалы представляют собой ортотропную среду с разными значениями прочности при разных типах нагружения (растяжение, сжатие, сдвиг, сложное напряженное состояние). В статической области скоростей деформации свойства композитов достаточно хорошо изучены. Существует порядка 70 ГОСТов на испытания композитов, из них около 30 относятся к методам определения механических характеристик. Однако для ряда важных задач, возникающих при проектировании конструкций из КМ, существенным является учет влияния скорости деформации на прочностные и деформационные характеристики. В связи с этим разработка методов и схем определения широкого спектра деформационных и прочностных характеристик ПКМ в динамической области нагружения является весьма актуальной задачей.

В настоящее время наибольшее развитие получили методики динамических испытаний на базе классической схемы разрезного стержня Гопкинсона – Кольского [1]. Основная идея метода состоит в использовании мерных стержней для опосредованного измерения перемещения точек образца во времени и истории изменения силы, действующей на образец в процессе нагружения. Благодаря небольшой длине образца по сравнению с длиной нагружающего импульса напряжения и деформации по всей его длине распределяются равномерно, а деформирование происходит в условиях так называемого «динамического равновесия». Используется множество модификаций метода разрезного стержня Гопкинса (РСГ) на сжатие, растяжение, срез, крутильные испытания и т.д. Описание различных вариантов РСГ можно найти в публикациях [2–12].

В последнее десятилетие методы, основанные на технике мерных стержней, широко применяются для исследования полимеров [13] и конструктивных ПКМ с различными схемами армирования. Так, например, выполнены исследования влияния скорости деформации на динамическое поведение тканых ПКМ при растяжении [14, 15] и сжатии [16, 17]. Скоростные зависимости кривых деформирования однонаправленных углепластиков при растяжении [18] и сжатии [19] в направлении, поперечном направлению волокон, и сдвиге в плоскости слоя [19] получены при скоростях деформации  $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$ . Авторами [20] получены диаграммы деформирования при нагружении однонаправленного углепластика в направлении, перпендикулярном направлению волокон, в диапазоне скоростей деформации  $10\text{--}2000 \text{ с}^{-1}$  с использованием метода копровых испытаний и метода РСГ. В статье [21] представлены экспериментальные исследования динамического поведения и демпфирующих свойств при сжатии термопластичного, наполненного углеродными наночастицами, полимера с использованием классической схемы метода РСГ при скоростях деформации  $2000\text{--}7000 \text{ с}^{-1}$ .

Цель настоящей статьи состоит в разработке и апробации методик исследования динамических характеристик прочности слоистых ПКМ при межслойном сдвиге. Для определения динамических характеристик прочности ПКМ при межслойном

сдвиге предложено и апробировано три экспериментальные схемы: динамический трехточечный изгиб короткой балки, динамическое сжатие образцов-пластин с надрезами и динамическое выдавливание средней части образцов в виде параллелепипедов.

### Динамический трехточечный изгиб короткой балки

Для определения характеристик прочности при межслойном сдвиге ПКМ при динамическом нагружении по аналогии с ГОСТ-32659-2014 (ISO 14130:1997) на статические испытания композитов проводились эксперименты на трехточечный изгиб короткой балки. В экспериментах использовались мерные стержни диаметром 20 мм. Радиусы скруглений стержней и расстояние между опорными стержнями выбирались согласно ГОСТ-32659-2014 (ISO 14130:1997). Геометрические характеристики образцов-балок (длина  $L$ , ширина  $w$  и высота  $h$ ) показаны на рис. 1. Размеры образцов составляли 45×12×6 мм. Образец нагружается сжимающим импульсом через нагружающий мерный стержень.

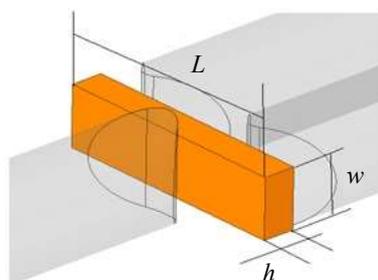


Рис. 1. Геометрические характеристики образца

Одним из принципиальных допущений и условий применимости метода Кольского для определения характеристик материалов образцов является условие динамического равновесия образца в процессе нагружения. Это означает, что в каждый момент времени сила  $F(t)$ , действующая на образец со стороны нагружающего мерного стержня, должна быть равна сумме сил  $F_1(t) + F_2(t)$ , действующих на образец со стороны опорных стержней.

Для оценки условий динамического равновесия образца-балки в используемой конфигурации испытательной установки проведено численное моделирование в пакете программ LS-DYNA (Customernumber 1069197). Результаты приводятся на рис. 2, где показана история изменения сил, действующих на образец со стороны мерных стержней. Цифрами обозначены кривые в зависимости от времени: 1 – сила с контакта нагружающий стержень–образец, 2 – удвоенная сила с контакта образец–опорный стержень, 3 – удвоенная сила, рассчитанная по данным датчика деформации на опорном стержне. Можно сделать выводы: во-первых, сила, действующая на образец со стороны нагружающего стержня, в каждый момент времени очень близка по величине силе, действующей на образец со стороны опорных мерных стержней. Разница по времени между началом действия первой силы  $F$  и появлением силы на опорных стержнях  $F_1$  и  $F_2$  составляет порядка 10 мкс, то есть в процессе деформирования в образце имеет место условие динамического равновесия. Во-вторых,

информация с датчика деформации, расположенного на опорном стержне, позволяет достаточно точно определить силу  $F_1$  ( $F_2$ ).

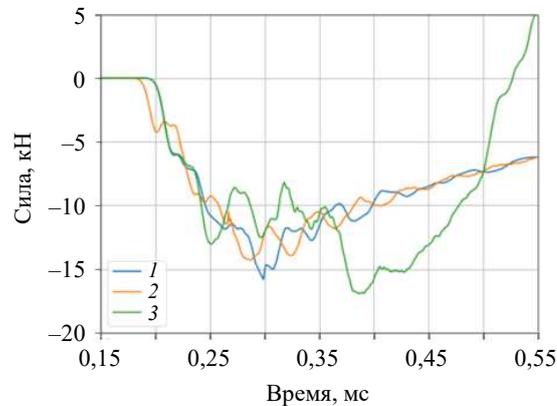


Рис. 2. Силы, действующие на образец

Для обработки экспериментальной информации, полученной при изгибе композитной балки, используются следующие соотношения:

– скорость прогиба балки

$$V_b(t) = c_1(\varepsilon^I + \varepsilon^R) - 0,5c_T(\varepsilon_1^T + \varepsilon_2^T);$$

– прогиб балки

$$U_b(t) = \int_0^t V_b(\tau) d\tau;$$

– действующая на образец сила

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) = E_T S_T (\varepsilon_1^T + \varepsilon_2^T).$$

Здесь  $\sigma^I, \sigma^R$  – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне;  $\varepsilon_1^T, \varepsilon_2^T$  – прошедшие импульсы деформации, зарегистрированные в первом и втором опорных стержнях соответственно;  $c_1$  – стержневая скорость звука материала нагружающего стержня;  $c_T$  – стержневая скорость звука материала опорного стержня;  $E_T, S_T$  – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорных мерных стержней.

Кажущееся межслойное сдвиговое напряжение рассчитывается согласно ГОСТ-32659-2014 по формуле:

$$\tau(t) = \frac{3}{4} \cdot \frac{F(t)}{hw}.$$

Значение кажущейся межслойной прочности при сдвиге  $\tau^*$  определяется как максимум  $\tau(t)$  в экспериментах, где в результате нагружения в образце образовалось одинарное или множественное расслоение (рис. 3).



Рис. 3. «Зачетные» виды разрушения образца (из ГОСТ-32659-2014)

Апробация схемы проводилась на балках из слоистого ПКМ на основе углеткани. Фотографии образцов после испытания показаны на рис. 4. В зависимости от амплитуды нагружающей волны (скорости ударника) наблюдаются разные режимы разрушения образца. На левой части фотографии на торце образца видна одиночная трещина, на правой наблюдается интенсивное множественное расслоение в зоне нагружения.



Рис. 4. Типы разрушения образца

Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте, приводятся на рис. 5. Можно отметить, что импульсы, зарегистрированные на опорных стержнях, достаточно хорошо согласуются между собой, что свидетельствует о правильной юстировке экспериментальной установки и точной установке испытуемого образца.

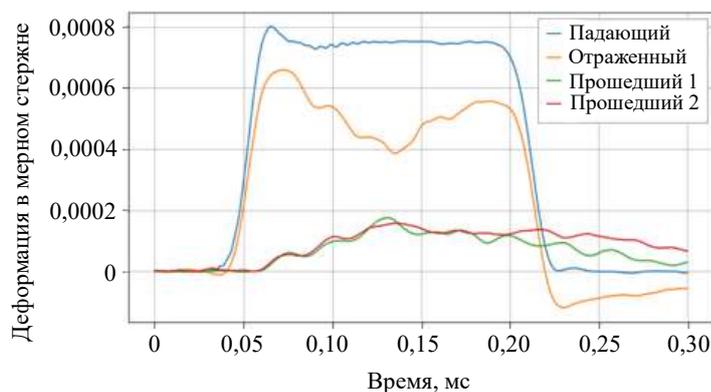


Рис. 5. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте на трехточечный изгиб короткой балки

Рисунок 6 иллюстрирует сравнение сил, действующих на образец со стороны нагружающего ( $F$ ) и опорных ( $F_1 + F_2$ ) стержней. Можно отметить довольно хорошее соответствие этих сил, что свидетельствует о выполнении условий динамического равновесия образца-балки в процессе изгиба.

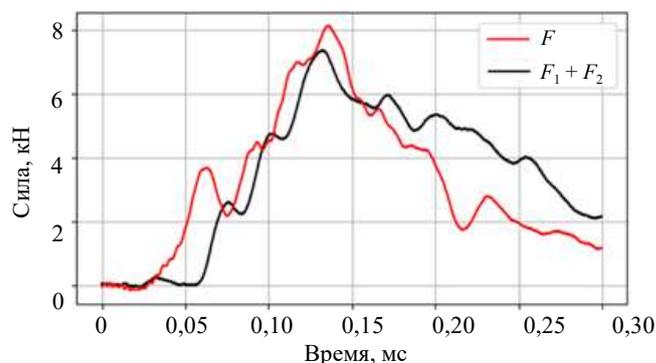


Рис. 6. Сравнение сил, действующих на образец со стороны мерных стержней

По результатам эксперимента с использованием формул, приведенных выше, рассчитывались следующие параметры: скорость прогиба балки, сила  $F$ , действующая на образец в процессе испытания, и величина сдвигового напряжения  $\tau$ . На рис. 7 показаны истории изменения скорости прогиба балки (синяя линия, левая вертикальная ось) и действующей на нее силы  $F$  (красная линия, правая вертикальная ось). Для каждого эксперимента определялось максимальное значение силы и соответствующее значение скорости прогиба. По максимальной силе  $F$  рассчитывалось значение кажущейся прочности ПКМ при межслойном сдвиге.

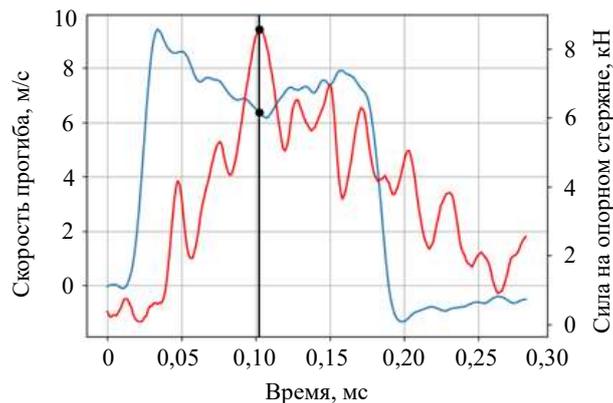


Рис. 7. Обработка эксперимента на изгиб короткой балки

Графически результаты экспериментов представлены на рис. 8. Цвет точек характеризует режимы разрушения образца: 1 соответствует появлению на торце образца одиночной трещины, 2 – появлению множественного расслоения в зоне нагружения, 3 – интенсивному множественному расслоению в зоне нагружения. Можно сделать вывод о том, что динамическая прочность оказывается на 15% выше величины статической прочности.

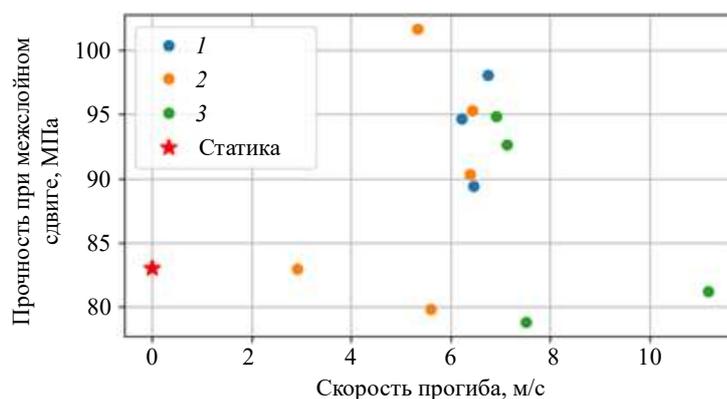


Рис. 8. Результаты определения прочности при межслойном сдвиге методом изгиба короткой балки

### Определение межслойной прочности при сдвиге

Во второй схеме для определения межслойной прочности при сдвиге испытывались образцы с надрезами, конфигурация которых показана на рис. 9а.

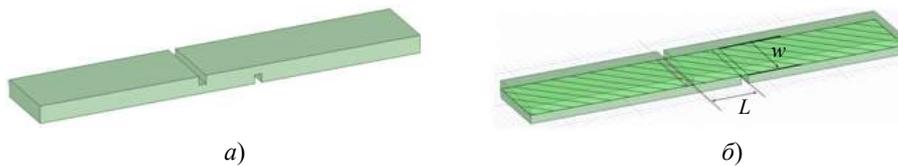


Рис. 9. Конфигурация образца на определение межслоистой прочности при сдвиге

Для обработки экспериментальной информации используются следующие соотношения:

– скорость сдвига

$$V_{sh}(t) = c_l(\varepsilon^l + \varepsilon^R) - c_T \varepsilon^T;$$

– сдвиговое напряжение

$$\tau(t) = \frac{E_T S_T \varepsilon^T}{L \cdot w}.$$

Здесь  $\varepsilon^l$ ,  $\varepsilon^R$  – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне;  $\varepsilon^T$  – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне;  $c_l$ ,  $c_T$  – стержневые скорости звука материала нагружающего и опорного стержней соответственно;  $E_T$ ,  $S_T$  – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня;  $L$  и  $w$  – длина и ширина рабочей зоны образца (см. рис. 9б).

Апробация схемы проводилась на балках из слоистого ПКМ на основе углеткани. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте, приводятся на рис. 10.

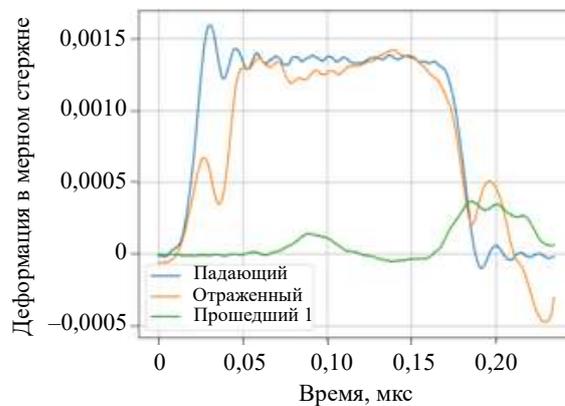


Рис. 10. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте на сжатие образцов с надрезами

Рисунок 11 иллюстрирует сравнение сил, действующих на образец со стороны нагружающего ( $F_1$ ) и опорного ( $F_2$ ) стержней, рассчитанных по формулам Кольского. Наличие сложной оснастки для крепления образца к мерным стержням (вилки+стягивающие обоймы) вносит искажения в волновую картину. Массивные элементы приводят к дополнительным отражениям волн. На отраженном импульсе в начале появляется провал и, соответственно, на силе, которая определяется разностью падающего и отраженного импульсов, появляется выброс, который не отражает силу, действующую на образец, а представляет собой суперпозицию сил, действующих на об-

разец и инертную массивную оснастку. Однако в течение нагружения образца (если судить по силе в опорном стержне) условие динамического равновесия имеет место.

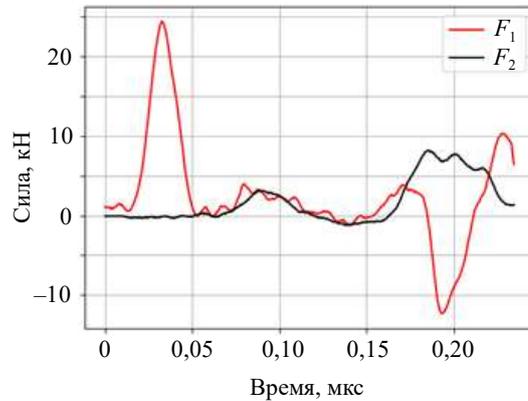


Рис. 11. Сравнение сил, действующих на образец со стороны мерных стержней

По результатам эксперимента с использованием формул, приведенных ранее, рассчитывались следующие параметры: скорость сдвига, сила  $F$ , действующая на образец в процессе испытания, и величина сдвигового напряжения  $\tau$ . На рис. 12 показаны истории изменения скорости сдвига (синяя линия, левая вертикальная ось) и действующей на образец силы  $F$  (красная линия, правая вертикальная ось). График силы имеет несколько пиков. Первый пик соответствует разрушению образца по плоскости среза. Во время второго пика происходит смыкание частей образца при выборе зазора, образуемого пропилом. Для каждого эксперимента определялось максимальное значение силы в первом пике и соответствующее значение скорости сдвига. По максимальной силе  $F$  с использованием соответствующей формулы рассчитывалось значение прочности ПКМ при межслойном сдвиге.

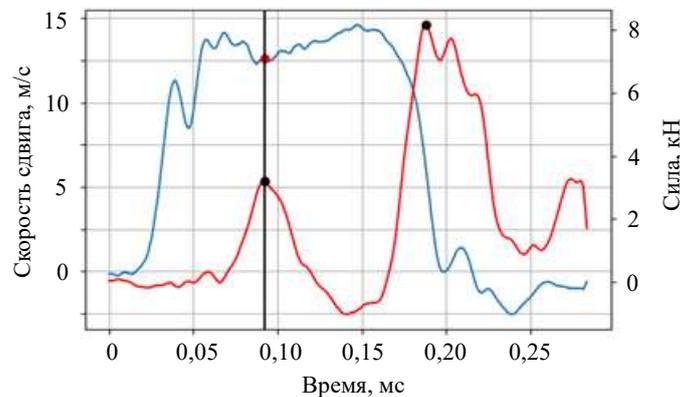


Рис. 12. Обработка эксперимента на сжатие образцов с надрезами

Графически результаты испытаний представлены на рис. 13. Точки сгруппированы по толщине образца. Синие маркеры соответствуют образцам толщиной 2 мм, оранжевые – образцам толщиной 6,5 мм. Динамическая прочность по данным указанного метода испытаний оказалась ниже статической прочности.

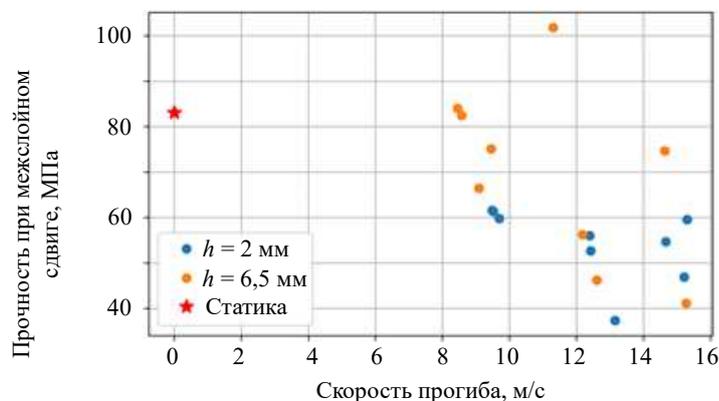


Рис. 13. Результаты определения прочности при межслойном сдвиге методом сжатия образцов с надрезами

### Определение межслойной прочности при сдвиге ПКМ выдавливанием середины образца-параллелепипеда

Для определения межслойной прочности при сдвиге ПКМ использовалась схема на выдавливание середины образца-параллелепипеда (двухплоскостной сдвиг). Нагружение в системе РСГ проводилось сжимающей нагрузкой. Общий вид экспериментальной схемы показан на рис. 14а. Оснастка для нагружения образца 5 (рис. 14б) в системе РСГ (мерные стержни 1 и 2) включает в себя детали 3 и 4, а также направляющую 6 для центрирования деталей.

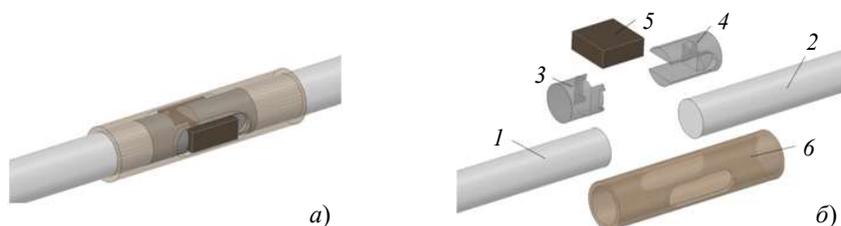


Рис. 14. Общий вид экспериментальной схемы

При нагружении образца в описанной оснастке в нем происходит сдвиг по плоскостям, выделенным красным цветом на рис. 15. Испытывались образцы 25×25×10 мм.

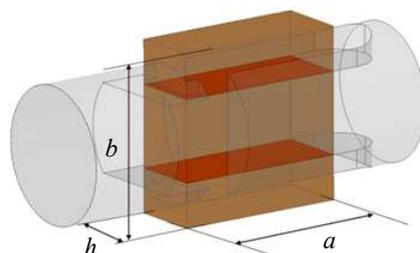


Рис. 15. Геометрические характеристики образца

Для обработки экспериментальной информации используются следующие соотношения:

– скорость сдвига

$$V_{sh}(t) = c_I(\varepsilon^I + \varepsilon^R) - c_T\varepsilon^T;$$

– сдвиговое напряжение

$$\tau(t) = \frac{E_T S_T \varepsilon^T}{2ah}.$$

Здесь  $\varepsilon^I, \varepsilon^R$  – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне;  $\varepsilon^T$  – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне;  $c_I, c_T$  – стержневые скорости звука материала нагружающего и опорного стержней соответственно;  $E_T, S_T$  – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня;  $a$  и  $h$  – длина и ширина зоны сдвига.

Апробация схемы проводилась на балках из слоистого ПКМ на основе углеткани. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте, приводятся на рис. 16.

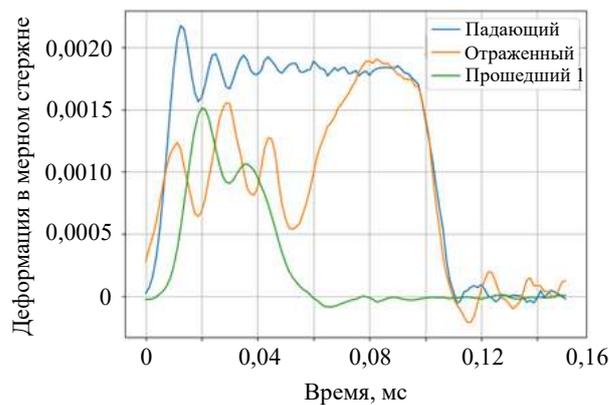


Рис. 16. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте на выдавливание

Рисунок 17 иллюстрирует сравнение сил, действующих на образец со стороны нагружающего ( $F_1$ ) и опорного ( $F_2$ ) стержней, рассчитанных по формулам Кольского.

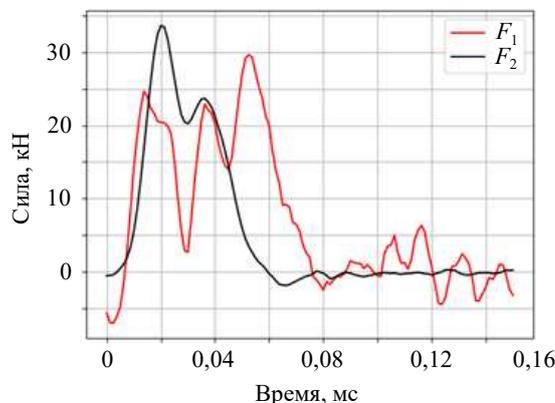


Рис. 17. Сравнение сил, действующих на образец со стороны мерных стержней

Видно, что наличие переходников, используемых для реализации выдавливания, вносит искажения в волновую картину, вследствие чего условия динамического равновесия не выполняются.

По результатам эксперимента рассчитывались следующие параметры: скорость сдвига, сила  $F$ , действующая на образец в процессе испытания, и величина сдвигового напряжения  $\tau$ . Сила определяется по импульсу в опорном мерном стержне. На рис. 18 показаны истории изменения скорости сдвига (синяя линия, левая вертикальная ось) и действующей на образец силы  $F$  (красная линия, правая вертикальная ось). Для каждого эксперимента определялось максимальное значение силы и соответствующее значение скорости сдвига. По максимальной силе  $F$  с использованием соответствующей формулы рассчитывалось значение прочности ПКМ при межслойном сдвиге.

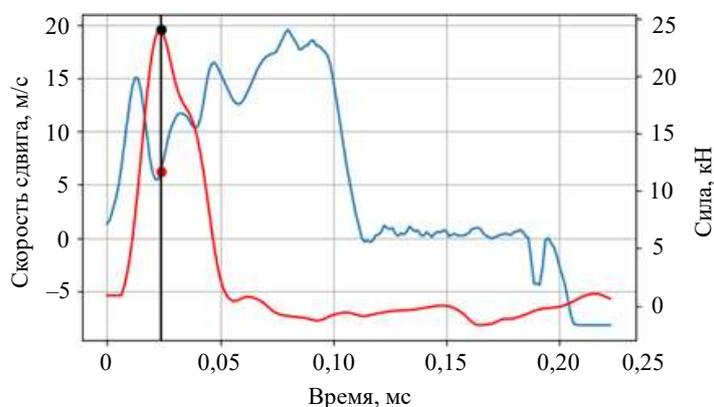


Рис.18. Обработка эксперимента на выдавливание

Результаты обработки всех экспериментов проиллюстрированы на рис. 19. Звездочка отвечает статическому значению сдвиговой прочности при межслойном сдвиге. Полученные в динамическом диапазоне значения межслойной сдвиговой прочности в среднем оказались на 25% ниже статической характеристики.

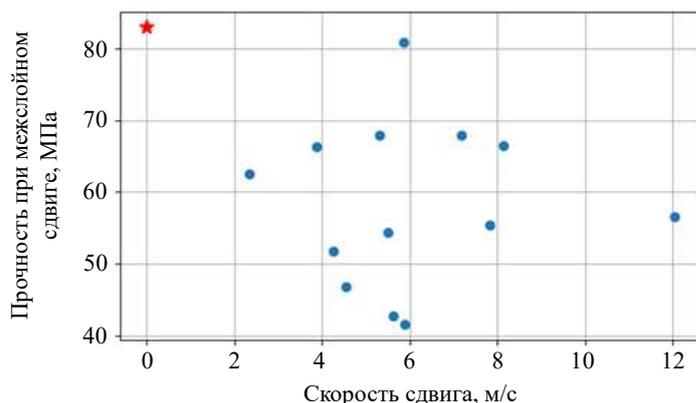


Рис. 19. Результаты определения прочности при межслойном сдвиге методом выдавливания

На рис. 20 приводится сравнение величин прочности ПКМ при межслойном сдвиге, полученных разными методами. Обозначение  $Fr = 1, 2, 3$  при испытаниях коротких балок на трехточечный изгиб характеризует режимы разрушения образца

(см. рис. 8). Можно отметить, что данные, полученные методом выдавливания (красные треугольники), хорошо согласуются с данными, определенными при динамическом сжатии образцов с надрезами (оранжевые и синие квадраты). Характеристика прочности, определенная методом изгиба короткой балки, оказалась заметно выше.

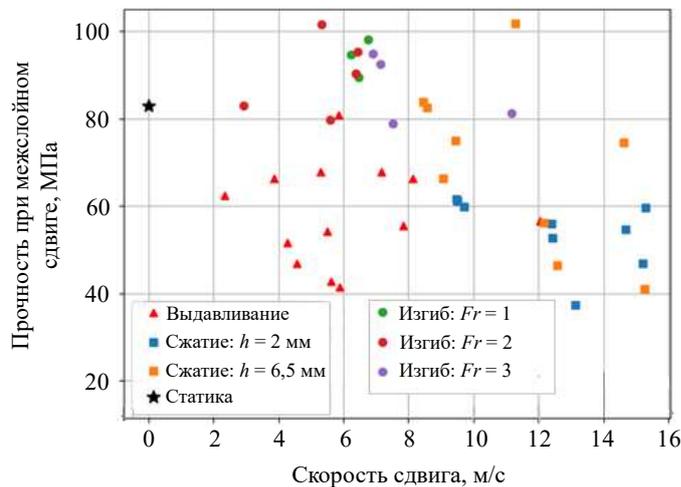


Рис. 20. Сравнение результатов, полученных разными методами

### Заключение

Создан ряд экспериментальных схем и соответствующих экспериментальных установок на базе техники мерных стержней, позволяющих проводить испытания образцов из ПКМ для определения характеристик прочности межслойного сдвига в зависимости от скорости нагружения. Метод динамического изгиба короткой балки не позволяет варьировать условия нагружения в достаточно широком диапазоне, так как в зависимости от интенсивности нагрузки меняется форма разрушения образца. Кроме того, в этом виде испытания невозможно оценить условия разрушения по исследуемой форме (например, скорость сдвига). Схема с испытанием образца с надрезами является несимметричной. Несмотря на малую толщину образца, в силу геометрических особенностей возникает изгибающий момент, что может нарушить изолированность моды разрушения по межслойному сдвигу. Наиболее информативной является схема с выдавливанием средней части образца в виде параллелепипеда. Апробация схем проведена на примере слоистого композита тканого армирования. Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных по описанным схемам.

### Список литературы

1. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. *Механика*. 1950. №4. С. 108–119.
2. Campbell J.D., Dowling A.R. The behaviour of materials subjected to dynamic incremental shear loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1970. Vol. 18. Iss. 1. P. 43–63. DOI: 10.1016/0022-5096(70)90013-X.
3. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. *Experimental Mechanics*. 1970. Vol. 10. Iss. 9. P. 370–376. DOI: 10.1007/BF02320419.
4. Doerner M.F., Nix W.D. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. *Journal of Materials Research*. 1986. Vol. 1. Iss. 4. P. 601–609. DOI: 10.1557/JMR.1986.0601.

5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. Vol. 21. Iss. 5. P. 177–195. DOI: 10.1007/BF02326644.
6. Большаков А.П., Новиков С.А., Сеницын В.А. Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6. *Проблемы прочности*. 1979. №10. С. 87–88.
7. Брагов А.М., Гандурин В.П., Грушевский Г.М., Ломунов А.К. Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов. *Прикладная механика и техническая физика*. 1995. Т. 36. №3. С. 179–186.
8. Даффи Дж., Кэмпбелл Дж., Хоули Р. О применении крутильного разрезного стержня Гопкинсона к исследованию влияния скорости нагружения на поведение алюминиевого сплава 1100-0. *Прикладная механика. Сер. Е. М.*: Мир, 1971. №1. С. 81–90.
9. Клепачко Я. Обсуждение нового экспериментального метода определения начала роста трещин при больших скоростях нагружения с помощью волн напряжения. *Теоретические основы инженерных расчетов: Труды Американского общества инженеров-механиков*. 1982. Т. 104. №1. С. 33–40.
10. Льюис Дж., Гольдсмит В. Двухосный стержень Гопкинсона для одновременного кручения и сжатия. Приборы для научных исследований. 1973. №7. С. 22–26.
11. Музыченко В.П., Кащенко С.И., Гуськов В.А. Применение метода составного стержня Гопкинсона при исследовании динамических свойств материалов (обзор). *Заводская лаборатория*. 1986. №1. С. 58–66.
12. Николас Т. Поведение материалов при высоких скоростях деформации. *Динамика удара*. Ред. Дж. Зукас и др. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 256 с.
13. Siviour C.R., Jordan J.L. High strain rate mechanics of polymers: A review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2016. Vol. 2. Iss. 1. P. 15–32. DOI: 10.1007/s40870-016-0052-8.
14. Elmahdy A., Verleysen P. Tensile behavior of woven basalt fiber reinforced composites at high strain rates. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 76. P. 207–221. DOI:10.1016/j.polymertesting.2019.03.016.
15. Elmahdy A., Verleysen P. Mechanical behavior of basalt and glass textile composites at high strain rates: A comparison. *Polymer Testing*. 2020. Vol. 81. Article No 106224. DOI:10.1016/j.polymertesting.2019.106224.
16. Liu T., Sun B., Gu B. Size effects on compressive behaviors of three-dimensional braided composites under high strain rates. *Journal of Composite Materials*. 2018. Vol. 53. Iss. 28. P. 3895–3908. DOI: 10.1177/0021998318771459.
17. Bandaru A.K., Chouhan H., Bhatnagar N. High strain rate compression testing of intra-ply and inter-ply hybrid thermoplastic composites reinforced with Kevlar/basalt fibers. *Polymer Testing*. 2020. Vol. 84. Article No 106407. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106407.
18. Melin L., Asp L. Effects of strain rate on transverse tension properties of a carbon/epoxy composite: Studied by moiré photography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30. Iss. 3. P. 305–316. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00123-7.
19. Koerber H., Xavier J., Camanho P.P. High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation. *Mechanics of Materials*. 2010. Vol. 42. Iss. 11. P. 1004–1019. DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.09.003.
20. Cherniaev A., Zenga Y., Cronina D., Montesano J. Quasi-static and dynamic characterization of unidirectional non-crimp carbon fiber fabric composites processed by HP-RTM. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 76. P. 365–375. DOI: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.03.036.
21. Akl W., Baz A.M. Dynamic behavior and damping characteristics of carbon black polymer composites at high strain rates. *Advances in Polymer Technology*. 2018. Vol. 37. No 2. P. 3364–3375. DOI: 10.1002/ADV.22120.

#### References

1. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proc. Phys. Soc. B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700.
2. Campbell J.D., Dowling A.R. The behaviour of materials subjected to dynamic incremental shear loading. *J. Mech. Phys. Solids*. 1970. Vol. 18. Iss. 1. P. 43–63. DOI: 10.1016/0022-5096(70)90013-X.

3. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. *Exp. Mech.* 1970. Vol. 10. Iss. 9. P. 370–376. DOI: 10.1007/BF02320419.
4. Doerner M.F., Nix W.D. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. *J. Mater. Res.* 1986. Vol. 1. Iss. 4. P. 601–609. DOI: 10.1557/JMR. 1986.0601.
5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Exp. Mech.* 1981. Vol. 21. Iss. 5. P. 177–195. DOI: 10.1007/BF02326644.
6. Bol'shakov A.P., Novikov S.A., Sinityn V.A. Dynamic uniaxial tension and compression curves of copper and alloy AMg6. *Strength of Materials.* 1979. Vol. 11. Iss. 10. P. 1159–1161.
7. Bragov A.M., Gandurin V.P., Grushevskiy G.M., Lomunov A.K. Novye vozmozhnosti metoda Kolskogo dlya issledovaniya dinamicheskikh svoystv myagkikh gruntov [New possibilities of the Kolsky method for studying the properties of soft soils]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [J. Appl. Mech. Tech. Phys.]*. 1995. Vol. 36. No 3. P. 179–186 (In Russian).
8. Duffy J.A., Campbell J.D., Hawley R.H. On the use of a torsional split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminum. *J. Appl. Mech.* 1971. Vol. 38. Iss. 1. P. 83–91. DOI: 10.1115/1.3408771.
9. Klepaczko J.R. Obsuzhdenie novogo eksperimentalnogo metoda opredeleniya nachala rosta treshchin pri bolshikh skorostyakh nagruzheniya s pomoshchyu voln napryazheniya [Discussion of a new experimental method in measuring fracture toughness initiation at high loading rates by stress waves]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov: Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov [Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME. Series B]*. 1982. Vol. 104. No 1. P. 33–40 (In Russian).
10. Lewis J.L., Goldsmith W. A biaxial split Hopkinson bar for simultaneous torsion and compression. *The Review of Scientific Instruments.* 1973. Vol. 44. Iss. 7. P. 811–813. DOI: 10.1063/1.1686253.
11. Muzychenko V.P., Kashchenko S.I., Guskov V.A. Primenenie metoda sostavnogo sterzhnya Gopkinsona pri issledovanii dinamicheskikh svoystv materialov (obzor) [New possibilities of the Kolsky method for studying the properties of soft soils]. *Zavodskaya laboratoriya [Industrial Laboratory]*. 1986. No 1. P. 58–66 (In Russian).
12. Zukas J.A., Nicholas T., Swift H., Greszczuk L.B., Curran D.R. *Impact Dynamics*. New York. Chichester. Brisbane. Toronto. Singapore. 1982. 452 p.
13. Siviour C.R., Jordan J.L. High strain rate mechanics of polymers: A review. *J. Dyn. Behav. Mater.* 2016. Vol. 2. Iss. 1. P. 15–32. DOI: 10.1007/s40870-016-0052-8.
14. Elmahdy A., Verleysen P. Tensile behavior of woven basalt fiber reinforced composites at high strain rates. *Polym. Test.* 2019. Vol. 76. P. 207–221. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.03.016.
15. Elmahdy A., Verleysen P. Mechanical behavior of basalt and glass textile composites at high strain rates: A comparison. *Polym. Test.* 2020. Vol. 81. Article No 106224. DOI:10.1016/j.polymertesting.2019.106224.
16. Liu T., Sun B., Gu B. Size effects on compressive behaviors of three-dimensional braided composites under high strain rates. *J. Compos. Mater.* 2018. Vol. 53. Iss. 28. P. 3895–3908. DOI: 10.1177/0021998318771459.
17. Bandaru A.K., Chouhan H., Bhatnagar N. High strain rate compression testing of intra-ply and inter-ply hybrid thermoplastic composites reinforced with Kevlar/basalt fibers. *Polym. Test.* 2020. Vol. 84. Article No 106407. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106407.
18. Melin L., Asp L. Effects of strain rate on transverse tension properties of a carbon/epoxy composite: Studied by moiré photography. *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf.* 1999. Vol. 30. Iss. 3. P. 305–316. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00123-7.
19. Koerber H., Xavier J., Camanho P.P. High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation. *Mech. Mater.* 2010. Vol. 42. Iss. 11. P. 1004–1019. DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.09.003.
20. Cherniaev A., Zenga Y., Cronina D., Montesano J. Quasi-static and dynamic characterization of unidirectional non-crimp carbon fiber fabric composites processed by HP-RTM. *Polym. Test.* 2019. Vol. 76. P. 365–375. DOI: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.03.036.
21. Akl W., Baz A.M. Dynamic behavior and damping characteristics of carbon black polymer composites at high strain rates. *Adv. Polym. Technol.* 2018. Vol. 37. No 2. P. 3364–3375. DOI: 10.1002/ADV.22120.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF SCHEMES FOR DETERMINING  
THE DYNAMIC STRENGTH OF LAYERED COMPOSITES  
UNDER INTERLAYER SHEAR**

**Basalin A.V.**

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

To determine the mechanical characteristics under conditions of intense dynamic impacts of polymer composite materials during interlayer shear, three experimental schemes were proposed and tested: dynamic three-point bending of a short beam, dynamic compression of specimens-plates with notches, and dynamic extrusion of the middle part of specimens in the form of parallelepipeds. To create shock loads and record the response of the samples, the technique of measuring rods is used. The calculation of forces and displacements is carried out according to the Kolsky formulas according to the data of tensometric measurements. Using numerical simulation, one of the fundamental assumptions and conditions for the applicability of the Kolsky method for determining the characteristics of materials in an experiment on dynamic bending of a short beam, namely, the condition of dynamic equilibrium of the sample during loading, was verified. Approbation of the schemes was carried out on samples of a layered composite material with a polymer matrix reinforced with carbon fiber. A comparative analysis of the data obtained using three different test schemes is given. It is noted that the data obtained by the extrusion method are in good agreement with the data determined during dynamic compression of notched specimens. The strength characteristic, determined by the short beam bending method, turned out to be noticeably higher. It has been found that the interlaminar shear strength values determined in the dynamic range are, on average, 25% lower than the static characteristic. Of the three schemes, the most preferable is the scheme for extrusion of the middle part of the parallelepiped specimen, since, unlike beam bending, it allows you to vary and control the loading conditions, and, unlike testing notched specimens, it is symmetrical, which eliminates the appearance of bending moments in the specimen.

*Keywords:* strain rate, measuring bar, layered PCM, experiment, carbon fiber, delamination, interlayer shear.