

УДК 620.171.3, 53.091
EDN FGSC TT (<https://elibrary.ru/fgsc tt>)
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.01.06



СРАВНЕНИЕ ЧЕТЫРЁХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ТКАНЕВЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВНУТРИ- И МЕЖСЛОЙНОМ СДВИГЕ*

Гусейнов К.А., Силов В.А., Кудрявцев О.А., Сапожников С.Б.

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Для определения упругих и прочностных характеристик полимерных композитных материалов при сдвиге как в плоскости армирования, так и в трансверсальном направлении используются различные экспериментальные методики, основанные, в частности, на растяжении образца-полоски под углом 45° к направлению армирования, трехточечном изгибе балочного образца с разным отношением пролета к толщине, изгибе короткой балки или сдвиге образца с V-образными надрезами. В этих методиках достаточно сложно оценить влияние на результаты испытаний таких факторов, как разворот волокон, сложное напряженное состояние в рабочей части образцов, степень анизотропии и локальные контактные деформации. В связи с этим в данной работе было проведено комплексное исследование по оценке упругих и прочностных сдвиговых характеристик тканевого углепластика по отмеченным выше методикам. Анализ результатов показал, что испытания образцов Иосипеску на сдвиг в плоскости армирования и испытания образцов-полосок на растяжение под углом 45° к направлению армирования дают практически одинаковые значения сдвиговых характеристик, но лишь в диапазоне деформаций, ограниченном величиной 5-6%. Деформации разрушения при сдвиге в этих экспериментах существенно различаются: растяжение образцов-полосок даёт на 30% меньшие значения. Также было установлено, что, несмотря на различия в способах деформирования при испытаниях образцов Иосипеску на сдвиг в трансверсальном направлении и испытаниях на изгиб балочных образцов, значения упругих и прочностных сдвиговых характеристик тканевых углепластиков отличаются незначительно.

Ключевые слова: полимерные композитные материалы; испытания на сдвиг; метод Иосипеску; испытания на трехточечный изгиб; метод короткой балки

COMPARISON OF FOUR EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING THE ELASTIC AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER FABRIC COMPOSITES UNDER INTRA- AND INTERLAMINAR SHEAR

Guseinov K.A., Silov V.A., Kudryavtsev O.A., Sapozhnikov S.B.

*South Ural State University, Department of Engineering Mechanics,
Chelyabinsk, Russian Federation*

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект №23-19-20039).

ABSTRACT

Various experimental techniques are used to determine the elastic and strength properties of polymer composite materials under shear both in reinforcement plane and in transversal direction. Among them are tensile tests of specimens being cut at 45° to reinforcement direction, three-point bending tests of beam specimens with different span-to-thickness ratio, short beam bending tests, or V-notched (Iosipescu) specimen shear using special equipment. In these methods, it is quite difficult to assess the influence on test results of such factors as fibre rotation (fibre trellising), complex stress state in the specimen gauge section, anisotropy degree, and local contact deformations. In this work, a comprehensive experimental study was carried out to assess the elastic and shear strength characteristics of fabric carbon fiber reinforced plastic using the methods noted above. Analysis of the results showed that shear tests V-notched specimens and tensile tests of 45° specimens give almost identical values of shear characteristics for in-plane direction in the deformation range limited to 5-6%. The shear failure strains during tensile tests were 30% lower than ones in Iosipescu tests. It was also found that the values of the elastic and shear strength characteristics of fabric carbon fiber reinforced plastics in transversal direction, that were founded from Iosipescu and bending tests, differ slightly despite the differences in the loading methods and stress states.

Keywords: polymer-matrix composites (PMCs); shear testing; Iosipescu test; three-point bending test; short beam shear

ВВЕДЕНИЕ

Использование численного моделирования для проектирования, оценки прочности и ударостойкости конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ) требует наличия надежных данных о механических свойствах материалов. Механизмы разрушения ПКМ при ударе часто связаны со сдвигом матрицы, в связи с чем необходимо точно определять характеристики сдвига на уровне слоя. Для ортотропных тканевых композитов сдвиговые характеристики в трансверсальном направлении необходимо оценивать в дополнение к характеристикам в плоскости армирования, чтобы полностью описать поведение материала в условиях плоскостного и межслоевого сдвига.

На сегодняшний день используется большое количество экспериментальных методик для определения упругих и прочностных характеристик композитов при сдвиге [1-3]. Зачастую достаточно сложно оценить влияние особенностей методики испытаний на результаты ввиду многофакторности экспериментов. Только в некоторых случаях удается достичь достаточно однородного напряженного состояния в рабочем сечении образцов [1].

Испытание по методике Иосипеску [4] проводят на образцах с симметричными V-образными надрезами, расположенными по центру, в специализированном приспособлении, позволяющем локализовать деформацию сдвига в образце между надрезами. Известно, что наличие надреза в образцах Иосипеску создаёт концентрацию напряжений и в ряде случаев приводит к локальному разрушению вблизи корня надреза [5]. Зачастую при наличии небольшого эксцентриситета силы происходит кручение образца, которое приводит к снижению измеренного предела прочности [5]. Обширный анализ влияния различных негативных факторов на результаты экспериментов был представлен в работе [6]. Был сделан вывод, что современная модификация испытательного приспособления и увеличение толщины образцов Иосипеску позволяет нивелировать влияние негативных факторов на результаты испытаний.

Некоторые исследователи определяли сдвиговые характеристики в плоскости слоя на основе испытаний образцов на растяжение под углом 45° к направлению армирования [7]. Кумоса и др. [8] исследовали результаты испытаний образцов на растяжение под 45° и испытаний Иосипеску. Было обнаружено, что двухосное напряженное состояние приводило к заниженной оценке внутрислойной прочности на сдвиг при растяжении под углом 45° . В то же время при испытании образцов на растяжение под углом 45° на результаты испытаний влияет не только вид напряженного состояния. Явление разворота волокон в направлении нагрузки [9-10] оказывает непосредственное влияние на механическое поведение композита при больших деформациях. В случае проектирования композитных конструкций требуется более точный анализ влияния этих факторов на сдвиговые характеристики ПКМ.

Экспериментальные методики определения упругих и прочностных характеристик слоистых пластиков при трансверсальном сдвиге, основанные на изгибе балок, получили широкое распространение благодаря простоте их реализации [11]. Для определения модуля межслойного сдвига обработка результатов эксперимента проводится по известным формулам, учитывающим влияние поперечных сдвигов [12]. При определении межслойных упругих свойств слоистых пластиков метод испытаний на трехточечный изгиб часто считают приближенным, поскольку прогнозируемые значения межслойного модуля сдвига получаются заниженными [13,14]. Одна из причин заниженных оценок связана с учетом локальных деформационных эффектов, которые возникают в месте контакта образца с роликами [15,16]. Методика оценки межслойного модуля сдвига, учитывающая вклад локальных деформационных эффектов, была рассмотрена в работах [17,18]. В работе [18] было показано, что учет податливости образца в зоне нагружающего и опорных роликов позволяет с высокой точностью определить межслойный модуль сдвига как однонаправленных, так и тканевых углепластиков. Однако сопоставления прогнозов данной методики с альтернативными способами испытаний на межслойный сдвиг, например, с испытаниями образцов с V-образными надрезами, в литературе отсутствуют.

Для определения межслойной прочности ПКМ на практике также широко используют методику изгиба короткой балки [19]. В коротких образцах при изгибе касательные напряжения могут раньше достигнуть предела прочности, чем нормальные, и при этом происходит межслойное разрушение от сдвига. Согласно [11], в испытании короткой балки требуется зарегистрировать определенный вид разрушения по типу межслойного сдвига. Необходимость строгой идентификации вида разрушения в испытаниях на трехточечный изгиб короткой балки связана с тем, что максимальное напряжение сдвига может возникнуть в области, где могут существовать напряжения сжатия. В итоге, наблюдается комбинация режимов разрушения, и межслойное разрушение при сдвиге может не происходить на средней плоскости ламината [11]. Некоторые авторы [20,21] проводили сравнение результатов испытаний образцов коротких балок и образцов Иосипеску. Гурвиц и др. [20] продемонстрировали, что смешанный режим разрушения при испытаниях по методике изгиба короткой балки оказывает непосредственное влияние на результаты испытаний. Мерлин и др. [21] обнаружили, что методика изгиба короткой балки дает завышенные оценки межслойной прочности. Однако авторы ограничились исследованием только однонаправленных композитов.

Обзор литературы показал, что в настоящее время отсутствует систематический анализ многофакторности испытаний на результаты сдвиговых испытаний тканевых ПКМ. Целью данной работы было комплексное исследование четырех методов испытаний при оценке упругих и прочностных сдвиговых характеристик тканевых ПКМ в плоскости армирования и в трансверсальном направлении.

На начальном этапе методом горячего прессования были изготовлены композитные пластины на основе углеродной ткани саржевого переплетения и эпоксидной смолы. Образцы с V-образными надрезами, образцы-полоски и балочные образцы были вырезаны на фрезерном станке с ЧПУ. На заключительном этапе были проведены испытания образцов Иосипеску на сдвиг в плоскости армирования и в трансверсальном направлении, испытания на растяжение образцов-полосок под 45° к направлению армирования, испытания на трехточечный изгиб и изгиб короткой балки. Детальный анализ деформирования образцов тканевого углепластика был выполнен с использованием цифровой корреляции изображений (digital image correlation – DIC).

1. МАТЕРИАЛЫ, ОБРАЗЦЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Методом горячего прессования были изготовлены композитные пластины с размерами в плоскости 250×250 мм из 20 и 100 слоев равнопрочной углеткани саржевого переплетения (2/2, 3К, 200 г/м^2) и полимерного связующего из смеси эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ХТ-152Б с соотношением 54/46 вес. частей. Для обеспечения стабильной толщины и объемной доли армирующего наполнителя в композитных пластинах при прессовании между плитами устанавливали алюминиевые пластинки толщиной 4,0 мм и 20 мм соответственно. Отверждение проводили при температуре 120°C в течение 2 часов.

Далее, из композитных плит с помощью станка с ЧПУ Wattsan 6090 M1 рашпильной фрезой диаметром 2,0 мм с линейной скоростью реза 20 мм/с было изготовлено по три образца каждого типа для испытаний на сдвиг (рис.1), растяжение (рис.2) и изгиб (рис.3). Образцы были испытаны на универсальной испытательной машине INSTRON 5900R с силоизмерителем 100 кН.

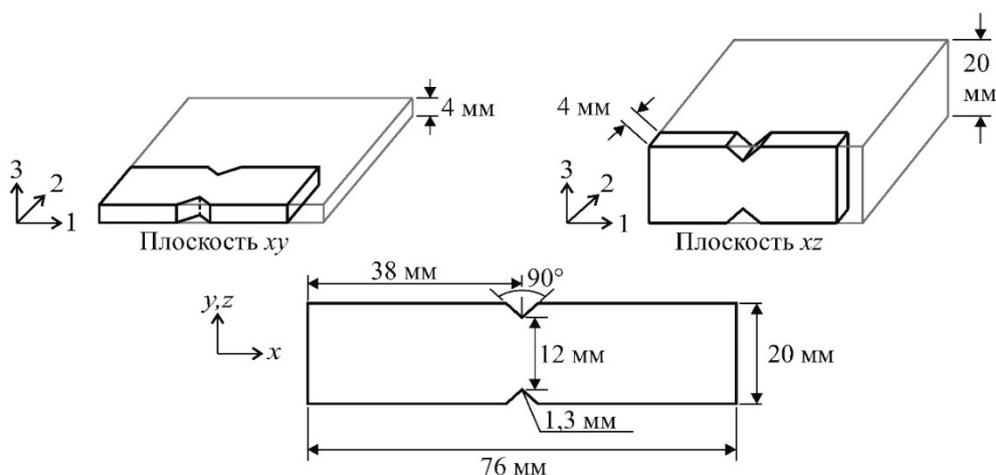


Рис.1. Схема вырезки и размеры образцов Иосипеску.

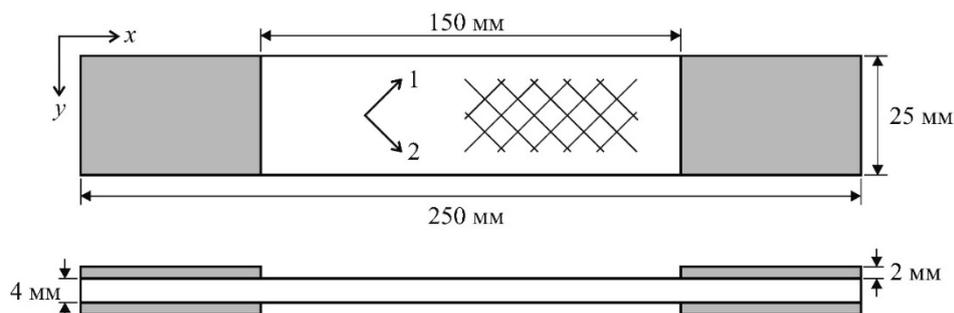


Рис.2. Образцы для испытаний на растяжение под углом 45° к направлению основы.

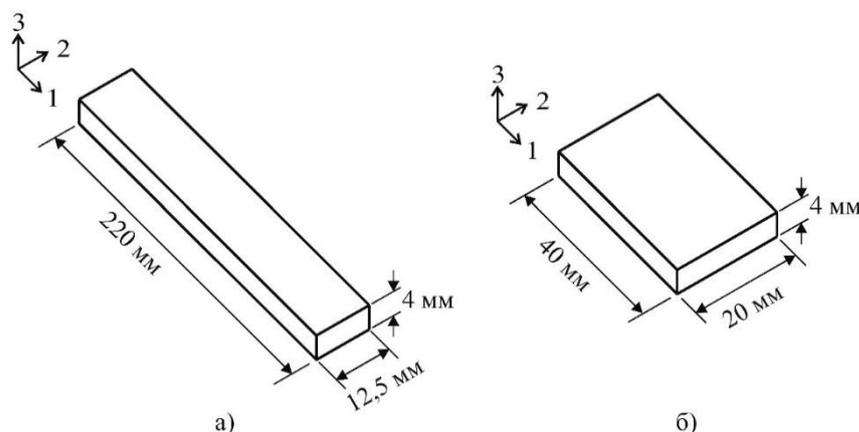


Рис.3. Образцы для испытаний на трехточечный изгиб (а) и образцы для испытаний по методу изгиба короткой балки (б).

2. МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПЛОСКОСТИ АРМИРОВАНИЯ

Испытания для определения сдвиговых характеристик в плоскости армирования проводили на основе рекомендаций стандартов ГОСТ-56799-2015 [4] и ГОСТ-32658-2014 [7]. Согласно стандарту ГОСТ-56799-2015, образцы с симметричными V-образными надрезами были нагружены в приспособлении Иосипеску, позволяющем локализовать деформацию сдвига в зоне между надрезами (рис.4). В соответствии с ГОСТ-32658-2014, образцы-полоски, вырезанные под 45° к направлению основы, были испытаны на растяжение (рис.5). Образцы центрировали и фиксировали в клиновых самозатягивающихся захватах таким образом, чтобы накладки были целиком зажаты между губок. Деформации в обоих случаях фиксировали с помощью системы Vic-2D, реализующей метод цифровой корреляции изображений (digital image correlation – DIC). Для построения кривой сдвига инженерная сдвиговая деформация была определена путем осреднения деформаций в рабочей части образцов на площадке с размерами 10×2 мм и 20×20 мм для образцов с надрезом и прямоугольных образцов соответственно. Сдвиговые напряжения в образцах с V-образными надрезами и образцах-полосках были определены по выражениям (1)-(2)

$$\tau_{12}^s = \frac{F}{b \cdot h}, \quad (1)$$

$$\tau_{12}^T = \frac{F}{2 \cdot b \cdot h}, \quad (2)$$

где τ_{12}^S – сдвиговые напряжения в плоскости 1-2 в образцах Иосипеску;
 τ_{12}^T – сдвиговые напряжения в плоскости 1-2 в образцах-полосках с укладкой [45°]; F – нагрузка; b, h – размеры поперечного сечения образцов.



Рис.4. Образец с V-образными надрезами при испытаниях на сдвиг.



Рис.5. Образец-полоска при испытаниях на растяжение под углом 45° к направлению армирования.

Модули сдвига определяли по диаграммам $\tau_{12} - \gamma_{12}$ «сдвиговые напряжения – деформации» в диапазоне деформаций 0,1-0,5%

$$G_{12} = \frac{\Delta \tau_{12}}{\Delta \gamma_{12}}, \quad (3)$$

где $\Delta \tau_{12}$ – разность сдвиговых напряжений на выбранном диапазоне деформаций;
 $\Delta \gamma_{12}$ – разность сдвиговых деформаций на диапазоне 0,1-0,5%.

3. МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖСЛОЕВЫХ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Испытания для определения межслоевых сдвиговых характеристик проводили на основе рекомендаций стандартов ГОСТ-56799-2015 [4], ГОСТ-32659-2014 [19] и методик [17,22]. Образцы с симметричными V-образными надрезами были испытаны на сдвиг в плоскости 1-3. В соответствии с ГОСТ-32659-2014, были проведены испытания образцов по методу изгиба короткой балки. Испытания на трехточечный изгиб и обработку результатов проводили по стандартной [22] и модифицированной методике [17].

Для фиксации деформаций использовали два различных метода. При испытаниях образцов с V-образными надрезами и по методу изгиба короткой балки деформации в образцах фиксировали с помощью DIC. В первом случае, инженерная сдвиговая деформация была определена путем осреднения деформаций в рабочей части образцов, на площадке с размерами 10×2 мм. При испытаниях по методу изгиба короткой балки система цифровой корреляции изображений была использована для регистрации лишь механизма разрушения образцов. Для определения деформаций при трехточечном изгибе использовали экстензометр INSTRON 2620-601 с измерительной базой 50 мм, который был установлен на специальном щупе в середине пролета (рис.6). Межслоевые сдвиговые напряжения в образцах с V-образными надрезами и образцах короткой балки были определены по выражениям (4)-(5)

$$\tau_{13}^S = \frac{F}{b \cdot h}, \quad (4)$$

$$\tau_{13}^B = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \cdot h}, \quad (5)$$

где τ_{13}^S – сдвиговые напряжения в плоскости 1-3 в образцах Иосипеску;
 τ_{13}^B – сдвиговые напряжения в плоскости 1-3 при изгибе образцов короткой балки;
 F – нагрузка; b, h – размеры поперечного сечения образцов.

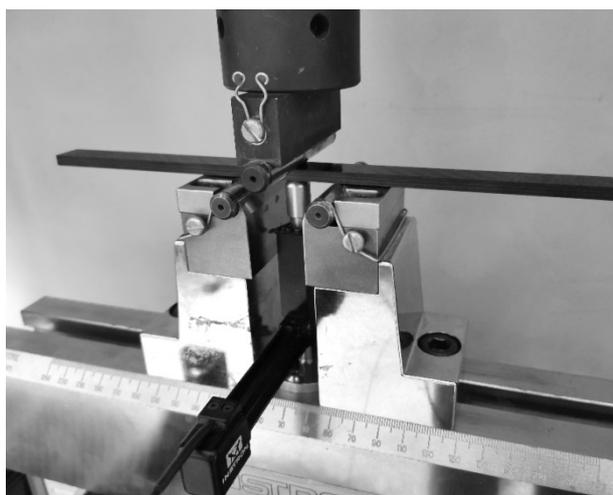


Рис.6. Балочный образец при испытаниях на трехточечный изгиб.

Модуль сдвига при испытаниях образцов Иосипеску в плоскости 1-3 определяли по диаграммам $\tau_{13} - \gamma_{13}$ в диапазоне деформаций 0,1-0,5%

$$G_{13} = \frac{\Delta\tau_{13}}{\Delta\gamma_{13}}, \quad (6)$$

где $\Delta\tau_{13}$ – разность сдвиговых напряжений в плоскости 1-3 на выбранном диапазоне деформаций; $\Delta\gamma_{13}$ – разность сдвиговых деформаций в плоскости 1-3 на диапазоне 0,1-0,5%.

Модуль сдвига при трехточечном изгибе определяли на основе стандартной [22] и модифицированной методики [17], учитывающей вклад локальных деформационных эффектов (рис.7) и, согласно которой полный прогиб балки определяется суммой следующих компонентов

$$\delta = \omega_b + \omega_s + \omega_l = \frac{1}{4} \cdot \frac{F \cdot L^3}{E_x \cdot b \cdot h^3} + \frac{3}{10} \cdot \frac{F \cdot L}{G_{xz} \cdot b \cdot h} + \frac{F}{k}, \quad (7)$$

где ω_b – прогиб от изгиба; ω_s – прогиб от сдвига; ω_l – прогиб от локальной контактной деформации; F – нагрузка; L – пролет; b – ширина образца; h – толщина образца; E_x – модуль упругости при изгибе; G_{xz} – межслойный модуль сдвига.

Процедура определения модуля сдвига при трехточечном изгибе состояла из нескольких этапов. Сначала были проведены испытания на трехточечный изгиб в диапазоне пролетов от 38 мм до 160 мм. После чего были определены значения кажущегося модуля при изгибе по выражению (8)

$$E_f = \frac{1}{4} \cdot \frac{F}{\delta} \cdot \frac{L^3}{b \cdot h^3}, \quad (8)$$

где F – нагрузка; b, h – размеры поперечного сечения образца; L – расстояние между опорами; δ – прогиб в середине пролета.

Вычисленные значения кажущегося модуля при изгибе на разных пролетах были подставлены в уравнения (9)-(10)

$$\frac{1}{E_f} = \frac{1}{E_x} + \frac{1,2}{G_{xz}} \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^2, \quad (9)$$

$$\frac{1}{E_f} = \frac{1}{E_x} + \frac{1,2}{G_{xz}} \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^2 + 4 \cdot \frac{b}{k} \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^3, \quad (10)$$

где k – локальная (контактная) жесткость, определяется как

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2 \cdot k_a} + \frac{1}{k_c}, \quad (11)$$

где

$$k_a = \frac{F}{2 \cdot \omega_a}, \quad (12)$$

$$k_c = \frac{F}{\omega_c}, \quad (13)$$

локальная жесткость, связанная с жесткостью машины и податливостью на опорах соответственно.

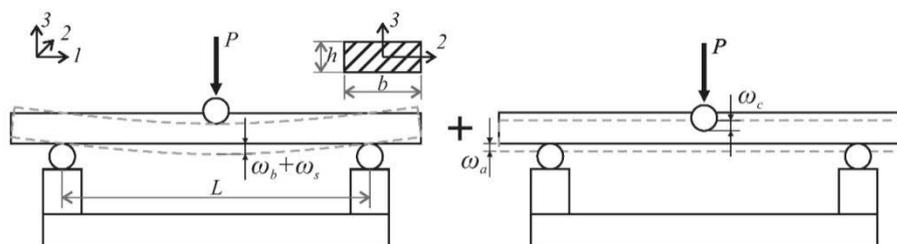


Рис.7. Различные компоненты полного прогиба при испытаниях на трехточечный изгиб.

Упругие характеристики и локальная контактная жесткость были определены с использованием метода наименьших квадратов по экспериментальным точкам, соответствующим различным отношениям пролета к толщине. Более подробно процедура испытаний на трехточечный изгиб для определения модуля сдвига в плоскости 1-3 представлена в работе [18].

4. АНАЛИЗ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПЛОСКОСТИ АРМИРОВАНИЯ

На рис.8-9 представлены полученные диаграммы «сдвиговые напряжения – сдвиговые деформации» из испытаний образцов с надрезами и образцов-полосок. Для детального анализа механического отклика диаграмму сдвига разделяют на несколько этапов деформирования на основе различных физических механизмов, таких как пластическое деформирование, накопление микротрещин в матрице, разворот волокон и др. [23].

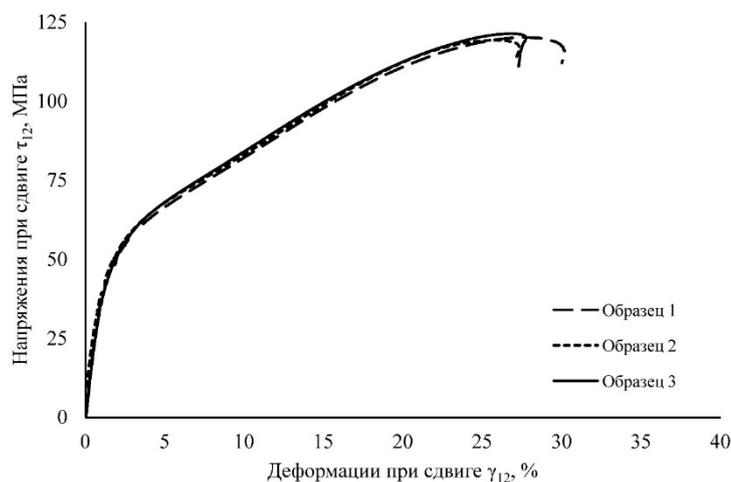


Рис.8. Зависимости «сдвиговые напряжения – сдвиговые деформации» образцов-полосок при испытаниях на растяжение под углом 45° .

На первом этапе деформирования, когда композит работает практически упруго вплоть до деформации сдвига $\sim 1\%$, отсутствует различие между экспериментальными результатами, полученными по двум методикам. Модуль сдвига составил $4,4 \pm 0,2$ ГПа при испытаниях образцов с V-образным надрезом и $4,4 \pm 0,1$ ГПа при растяжении образцов-полосок. Второй этап деформирования включает в себя неупругое деформирование матрицы, а также накопление микротрещин в матрице до так называемого уровня насыщения трещин [24]. Уровень деформаций в этом случае лежит в пределах 4-6%. Уже на этом этапе

деформирования проявляется незначительное отличие механического отклика по двум методикам, что связано с особенностями испытаний.

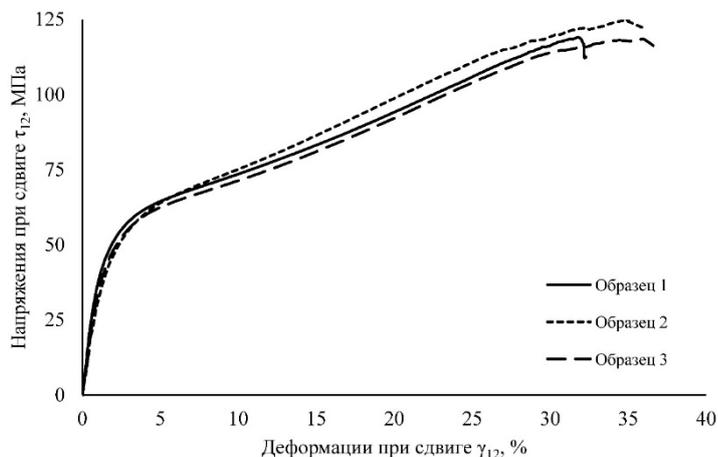


Рис.9. Зависимости «сдвиговые напряжения – сдвиговые деформации» образцов Иосипеску при испытаниях на сдвиг в плоскости слоя.

Прежде всего, при испытаниях по методу Иосипеску в рабочем сечении образца реализуется состояние, близкое к чистому сдвигу, в то время как при испытаниях образцов-полосок, вырезанных под 45° к направлению основы, в рабочей части образца помимо сдвиговых напряжений также действуют и нормальные [8]. В то же время источником значительной нелинейности при растяжении образцов-полосок является разворот волокон [9-10]. Несмотря на различия в механизмах деформирования при испытаниях на сдвиг образцов с V-образным надрезом и образцов, вырезанных под 45° к направлению основы, поведение композита до деформаций сдвига около 5% можно считать практически одинаковым, а эффекты влияния вида напряженного состояния и разворота волокон можно не учитывать. Необходимо отметить, что стандарты ГОСТ-56799-2015 и ГОСТ-32658-2014 также предлагают ограничиться при испытаниях уровнем сдвиговых деформаций 5%, если разрушения материала не происходит. Сдвиговые напряжения при уровне деформаций 5% составили 64 ± 1 МПа при испытаниях образцов с V-образным надрезом и $67,3 \pm 0,6$ МПа при испытаниях образцов на растяжение под 45° . На последующих этапах деформирования, при сдвиговой деформации более 5% и вплоть до разрушения образцов отличие по механическому отклику становится весьма существенным. Максимальные сдвиговые напряжения при испытаниях на сдвиг и на растяжение составили $122,7 \pm 3,4$ и $120,4 \pm 0,9$ МПа для двух видов испытаний соответственно. Отличие сдвиговых напряжений при максимальной нагрузке было невелико, в то время как предельная сдвиговая деформация составила 27,8% и 36,8%, соответственно. Таким образом, можно предположить, что при деформациях сдвига до 5-6% оба варианта испытаний могут быть использованы для определения механических характеристик в плоскости армирования.

5. АНАЛИЗ МЕЖСЛОЕВЫХ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

На рис.10 представлены диаграммы «сдвиговые напряжения – сдвиговые деформации» из испытаний образцов с V-образными надрезами в плоскости 1-3. На начальном участке деформирования был определен межслоевой модуль

сдвига, который составил $3,50 \pm 0,1$ ГПа. На следующем этапе деформирования накопление микрповреждений в матрице приводило к уменьшению жесткости и, в итоге, к расслоениям после достижения максимальной нагрузки (рис.10). Сдвиговые напряжения при максимальной нагрузке составили $64,2 \pm 1,4$ МПа.

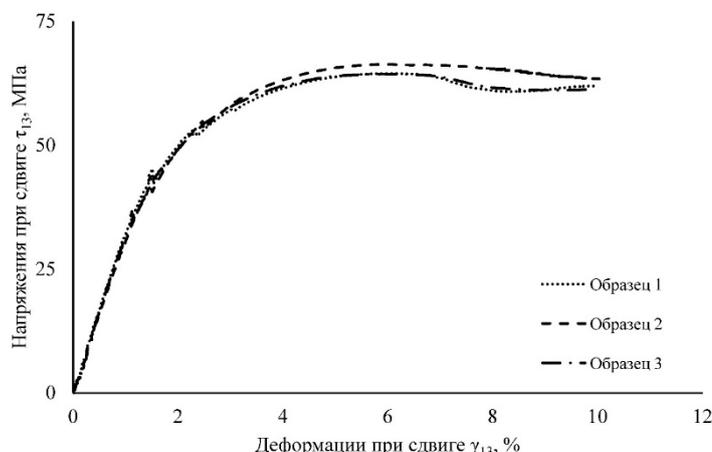


Рис.10. Зависимости «сдвиговые напряжения – сдвиговые деформации» образцов Иосипеску при испытаниях на сдвиг в трансверсальном направлении.

Результаты испытаний образцов на изгиб и оценки механических характеристик по различным методикам представлены в Таблицах 1-2. Следует отметить, что исследуемый тканевый углепластик обладает умеренной степенью анизотропии $E_x/G_{xz} = 19,3$ и, согласно [18], модуль сдвига таких материалов может быть определен с достаточной точностью из испытаний на трехточечный изгиб.

Таблица 1.

Фиктивный модуль упругости при трехточечном изгибе на разных длинах пролета.

L , мм	38	44	52	64	82	100	128	160
E_f , ГПа	49,3	53,1	56,4	59,1	61,4	63,1	63,7	65

Таблица 2.

Определенные значения упругих констант и локальной деформационной жесткости.

Метод	E_x , ГПа	G_{xz} , ГПа	k , кН/мм
Стандартная методика [22]	61,8	2,5	-
Модифицированная методика [17]	61,3	3,18	50

В Таблице 1 представлены полученные значения кажущегося модуля упругости при изгибе на образцах с разными пролетами. С уменьшением пролета наблюдалось монотонное снижение кажущегося модуля упругости при изгибе, что, прежде всего, связано с увеличением вклада сдвиговых деформаций. Полученные значения кажущегося модуля упругости при изгибе (табл.1) были использованы для определения упругих характеристик и локальной контактной жесткости (табл.2). Для этого был использован пакет MathCAD (функция

«genfit»). Стандартный [22] и модифицированный метод [17] оценки характеристик прогнозировали незначительное отличие модулей упругости (около 2%). Однако межслоевой модуль сдвига, вычисленный с учетом вклада локальных деформационных эффектов, стал больше на 27%. Следует отметить, что данная оценка межслоевого модуля хорошо согласуется с прогнозами по методике Иосипеску. Очевидно, что значение межслойного модуля сдвига, полученное по методике [22], является нижней оценкой.

Среднее значение межслойной прочности при испытаниях образцов по методу изгиба короткой балки составило 60,4 МПа. При испытаниях наблюдали механизм разрушения по типу межслоевого сдвига (рис.5). Несмотря на различия в механизмах деформирования при испытаниях образцов Иосипеску и испытаниях на изгиб, значения межслоевых механических характеристик тканевых углепластиков отличаются незначительно.



Рис.11. Разрушение образца короткой балки по типу межслоевого сдвига.

ВЫВОДЫ

Погрешности определения упругих и прочностных характеристик ПКМ при сдвиге связаны с влиянием на результаты испытаний ряда факторов: разворот волокон, сложное напряженное состояние, степень анизотропии и локальные контактные деформации. В данной работе была выполнена оценка влияния этих факторов на точность определения упругих и прочностных сдвиговых характеристик тканевых ПКМ. По результатам испытаний на сдвиг образцов Иосипеску, испытаний на растяжение образцов-полосок под углом 45° к направлению армирования, испытаний на трехточечный изгиб и изгиб короткой балки были определены упругие, прочностные и предельные деформационные характеристики тканевого углепластика при сдвиге в плоскости слоя и в трансверсальном направлении.

По результатам испытаний образцов Иосипеску на сдвиг в плоскости армирования и испытаний на растяжение образцов-полосок, вырезанных под 45° , было установлено, что до деформаций сдвига 5-6% оба метода дают близкие значения как модулей сдвига, так и максимальных сдвиговых напряжений (пределов прочности). Отличие между методиками составило около 5% при оценке модуля сдвига и сдвиговой прочности при 5% деформации соответственно. Влияние таких факторов как двухосное напряженное состояние, возникающее при растяжении образцов-полосок под 45° к направлению армирования, и разворот волокон не оказали существенного влияния на сдвиговые характеристики тканевых углепластиков. Таким образом, метод испытаний образцов-полосок может выступать в качестве альтернативы более сложной методике испытаний образцов Иосипеску при определении сдвиговых характеристик тканевых ПКМ.

При больших деформациях сдвига на механическое поведение образцов-полосок оказывал влияние эффект разворота волокон, что отражалось в большем упрочнении при аналогичном уровне деформаций. Совокупность влияния разворота волокон и наличия нормальных напряжений, характерных для образцов-полосок, значительно снижала предельную сдвиговую деформацию образцов. Отличие сдвиговых напряжений при максимальной нагрузке было незначительно, в то время как предельная сдвиговая деформация составила 27,8% и 36,8% при испытаниях на растяжение под углом 45° и на сдвиг по методике Иосипеску, соответственно. Следовательно, оценку нелинейного отклика при сдвиге тканевых ПКМ до разрушения рекомендуется выполнять по результатам испытаний образцов Иосипеску.

Также было установлено, что прогнозируемое на основе модифицированной методики обработки результатов испытаний на изгиб значение межслойного модуля сдвига хорошо согласуется с оценкой, полученной из испытаний образцов Иосипеску на сдвиг в трансверсальном направлении. Отличие модулей межслоевого сдвига составило менее 10%. Несмотря на то, что при испытаниях на изгиб короткой балки в рабочей части образца было реализовано сложное напряженное состояние, отличие от величины межслойной сдвиговой прочности по методу Иосипеску составило лишь 5,5%. Таким образом, при определении межслоевых сдвиговых характеристик тканевых ПКМ с умеренной степенью анизотропии ($E_x/G_{xz} = 19,3$) достаточно ограничиться методиками испытаний на изгиб балочных образцов из стандартных композитных плит, не прибегая к изготовлению образцов с V-образными надрезами из толстостенных плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chatterjee S., Adams D., Oplinger D.W. *Test Methods for Composites: A Status Report. Volume 3: Shear Test Methods* // DOT/FAA/CT-93/17 III, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ. – 1993. – 188 с.
2. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. *Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов* // Конструкции из композиционных материалов. – 2012. – №3. – С.72-77.
3. Мое Х.З., Хту Й.Т., Киреев В.А. *Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов* // Труды Московского физико-технического института. – 2018. – Т.10. – №2(38). – С.136-145.
4. *ГОСТ Р 56799-2015. Метод определения механических характеристик при сдвиге на образцах с V-образными надрезами.* – 2017. – 23 с.
5. Abot J.L., Daniel I.M. *Through-thickness mechanical characterization of woven fabric composites* // Journal of Composite Materials. – 2004. – Vol.38. – No.7. – Pp.543-553.
6. Stojcevski F., Hilditch T., Henderson L.C. *A modern account of Iosipescu testing* // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Vol.107. – Pp.545-554.
7. *ГОСТ 32658-2014. Определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования методом испытания на растяжение под углом ± 45 градусов.* – 2015. – 15 с.

8. Kumosa M., Odegard G., Armentrout D., Kumosa L., Searles K., Sutter J.K. *Comparison of the ± 45 tensile and Iosipescu shear tests for woven fabric composite materials* // Journal of Composites Technology and Research. – 2002. – Vol.24. – Pp.3-16.
9. Yang J., Yang X., Zhu H., Shi D., Chen X., Qi H. *The effect of off-axis angles on the mesoscale deformation response and failure behavior of an orthotropic textile carbon-epoxy composite* // Composite Structures. – 2018. – Vol.206. – Pp.952-959.
10. Koohbor B., Ravindran S., Kidane A. *Meso-scale study of non-linear tensile response and fiber trellising mechanisms in woven composites* // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2016. – Vol.35. – No.12. – Pp.986-995.
11. Mallick P.K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. – CRC press, 2007. – 638 p.
12. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced mechanics of composite materials and structural elements*. – Elsevier, 2013. – 818 p.
13. Sideridis E., Papadopoulos G.A. *Short-beam and three-point-bending tests for the study of shear and flexural properties in unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites* // Journal of Applied Polymer Science. – 2004. – Vol.93. – No.1. – Pp.63-74.
14. Caprino G., Iaccarino P., Lamboglia A. *The effect of shear on the rigidity in three-point bending of unidirectional CFRP laminates made of T800H/3900-2* // Composite structures. – 2009. – Vol.88. – No.3. – Pp.360-366.
15. Vinšová L., Urban T. *Testing of mechanical properties of thick-walled carbon fiber composite for FEM simulations* // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol.4. – No.5. – Pp.5989-5994.
16. Hongkarnjanakul N., Rivallant S., Bouvet C., Miranda A. *Permanent indentation characterization for low-velocity impact modelling using three-point bending test* // Journal of Composite Materials. – 2014. – Vol.48. – No.20. – Pp.2441-2454.
17. Mujika F. *On the effect of shear and local deformation in three-point bending tests* // Polymer testing. – 2007. – Vol.26. – No.7. – Pp.869-877.
18. Guseinov K., Sapozhnikov S.B., Kudryavtsev O.A. *Features of three-point bending tests for determining out-of-plane shear modulus of layered composites* // Mechanics of Composite Materials. – 2022. – Vol.58. – No.2. – Pp.155-168.
19. ГОСТ 32659-2014. *Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки*. – 2015. – 19 с.
20. Hurwitz F.I., Behrendt D.R. *Application of Iosipescu specimen geometry to determination of shear strength in unidirectional composites* // National Technical Conference. – 1984.
21. Melin L.G., Asp L.E., Neumeister J.M., Pettersson K.B., Johansson H. *Evaluation of four composite shear test methods by digital speckle strain mapping and fractographic analysis* // Composites Technology and Research. – 2000. – Vol.22. – No.3. – Pp.161-172.
22. Тарнопольский Ю.М., Киндис Т.Я. *Методы статических испытаний армированных пластиков*. – М.: Химия, 1975. – 262 с.
23. Fallahi H., Taheri-Behrooz F., Asadi A. *Nonlinear mechanical response of polymer matrix composites: a review* // Polymer Reviews. – 2020. – Vol.60. – No.1. – Pp.42-85.

24. Hufner D.R., Accorsi M.L. *A progressive failure theory for woven polymer-based composites subjected to dynamic loading* // Composite Structures. – 2009. – Vol.89. – No.2. – Pp.177-185.

REFERENCES

1. Chatterjee S., Adams D., Oplinger D.W. *Test Methods for Composites: A Status Report. Volume 3: Shear Test Methods* // DOT/FAA/CT-93/17 III, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ, 1993, 188 p.
2. Adamov A.A., Laptev M.Yu., Gorshkova E.G. *Analiz otechestvennoj i zarubezhnoj normativnoj bazy po mekhanicheskim ispytaniyam polimernykh kompozitsionnykh materialov [Analysis of domestic and foreign regulatory framework for mechanical testing of polymer composite materials]*. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov, 2012, No.3, Pp.72-77.
3. Moe Kh.Z., Khtu J.T., Kireev V.A. *Sravnienie metodik opredeleniya uprugikh i prochnostnykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov [Comparison of methods for determining the elastic and strength characteristics of polymer composite materials]*. Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta, 2018, Vol.10, No.2(38), Pp.136-145.
4. *GOST R 56799-2015. Metod opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik pri sdvige na obraztsakh s V-obraznymi nadrezami [Method for determining mechanical characteristics under shear on samples with V-shaped cuts]*. 2017, 36 p.
5. Abot J.L., Daniel I.M. *Through-thickness mechanical characterization of woven fabric composites*. Journal of Composite Materials, 2004, Vol.38, No.7, Pp.543-553.
6. Stojcevski F., Hilditch T., Henderson L.C. *A modern account of Iosipescu testing*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, Vol.107, Pp.545-554.
7. *GOST 32658-2014. Opredelenie mekhanicheskikh kharakteristik pri sdvige v ploskosti armirovaniya metodom ispytaniya na rastyazhenie pod uglom ± 45 gradusov [Determination of mechanical characteristics during shear in the plane of reinforcement by tensile testing at an angle of degrees]*. 2015, 15 p.
8. Kumosa M., Odegard G., Armentrout D., Kumosa L., Searles K., Sutter J.K. *Comparison of the ± 45 tensile and Iosipescu shear tests for woven fabric composite materials*. Journal of Composites Technology and Research, 2002, Vol.24, Pp.3-16.
9. Yang J., Yang X., Zhu H., Shi D., Chen X., Qi H. *The effect of off-axis angles on the mesoscale deformation response and failure behavior of an orthotropic textile carbon-epoxy composite*. Composite Structures, 2018, Vol.206, Pp.952-959.
10. Koohbor B., Ravindran S., Kidane A. *Meso-scale study of non-linear tensile response and fiber trellising mechanisms in woven composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016, Vol.35, No.12, Pp.986-995.
11. Mallick P.K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press, 2007, 638 p.
12. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced mechanics of composite materials and structural elements*. Elsevier, 2013, 818 p.
13. Sideridis E., Papadopoulos G.A. *Short-beam and three-point-bending tests for the study of shear and flexural properties in unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites*. Journal of Applied Polymer Science, 2004, Vol.93, No.1, Pp.63-74.
14. Caprino G., Iaccarino P., Lamboglia A. *The effect of shear on the rigidity in three-point bending of unidirectional CFRP laminates made of T800H/3900-2*. Composite structures, 2009, Vol.88, No.3, Pp.360-366.

15. Vinšová L., Urban T. *Testing of mechanical properties of thick-walled carbon fiber composite for FEM simulations*. Materials Today: Proceedings, 2017, Vol.4, No.5, Pp.5989-5994.
16. Hongkarnjanakul N., Rivallant S., Bouvet C., Miranda A. *Permanent indentation characterization for low-velocity impact modelling using three-point bending test*. Journal of Composite Materials, 2014, Vol.48, No.20, Pp.2441-2454.
17. Mujika F. *On the effect of shear and local deformation in three-point bending tests*. Polymer testing, 2007, Vol.26, No.7, Pp.869-877.
18. Gusejnov K., Sapozhnikov S.B., Kudryavtsev O.A. *Features of three-point bending tests for determining out-of-plane shear modulus of layered composites*. Mechanics of Composite Materials, 2022, Vol.58, No.2, Pp.155-168.
19. GOST 32659-2014. *Metody ispytaniy. Opredelenie kazhushhegosya predela prochnosti pri mezhslojnom sdvige metodom ispytaniya korotkoj balki [Test methods. Determination of apparent tensile strength in interlaminar shear using the short beam test method]*. 2015, 19 p.
20. Hurwitz F.I., Behrendt D.R. *Application of Iosipescu specimen geometry to determination of shear strength in unidirectional composites*. National Technical Conference, 1984.
21. Melin L.G., Asp L.E., Neumeister J.M., Pettersson K.B., Johansson H. *Evaluation of four composite shear test methods by digital speckle strain mapping and fractographic analysis*. Composites Technology and Research, 2000, Vol.22, No.3, Pp.161-172.
22. Tarnopol'skij Yu.M., Kintsis T.Ya. *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Methods for static testing of reinforced plastics]*. Moskva, Khimiya, 1975, 262 p.
23. Fallahi H., Taheri-Behrooz F., Asadi A. *Nonlinear mechanical response of polymer matrix composites: a review*. Polymer Reviews, 2020, Vol.60, No.1, Pp.42-85.
24. Hufner D.R., Accorsi M.L. *A progressive failure theory for woven polymer-based composites subjected to dynamic loading*. Composite Structures, 2009, Vol.89, No.2, Pp.177-185.

Поступила в редакцию 09 ноября 2023 года.

Сведения об авторах:

Гусейнов Кирилл Андреевич – инж.-иссл., Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; email: guseinovk@susu.ru

Силов Владислав Андреевич – лаб.-иссл., Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; email: vladsilov568@gmail.com

Кудрявцев Олег Александрович – к.т.н, доц., н.с., дир. Центра ПИРНКМ, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; email: kudriavtcevoa@susu.ru

Сапожников Сергей Борисович – д.т.н., проф., г.н.с., Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; email: sapozhnikovsb@susu.ru