

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-I-50-62>**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
ИСПЫТАНИЙ ПРИ СДВИГЕ В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА ОБРАЗЦОВ
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ****© Алексей Геннадьевич Попов*, Николай Викторович Матюшевский,
Наталья Геннадиевна Лисаченко**

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», Россия, 249031, Обнинск, Киевское шоссе, д. 15;

*e-mail: ag-popov@yandex.ru

*Статья поступила 12 апреля 2022 г. Поступила после доработки 28 июня 2022 г.
Принята к публикации 28 июля 2022 г.*

В процессе проведения механических испытаний для определения сдвиговых характеристик современных углепластиков возникают существенные проблемы. Это в первую очередь связано с трудностями реализации однородного распределения сдвиговых напряжений в рабочей части образцов, особенно при определении прочностных характеристик современных ПКМ на основе высокомодульных или высокопрочных углеродных волокон с укладкой $[\pm 45^\circ]_S$. В отличие от образцов из однонаправленных композитов свойства такого материала зависят от качества не только матрицы, но и волокон. Кроме того, следует отметить наличие большого количества методов испытаний при сдвиге в плоскости листа и соответствующих им стандартов. При этом результаты испытаний, выполненных по различным стандартам, на практике, как правило, не согласуются друг с другом. В работе проведен анализ сдвиговых характеристик углепластиков, полученных в результате применения различных методов испытаний. Получены расчетные и экспериментальные данные распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) для различных типов образцов. Экспериментальные прочностные и упругие характеристики углепластиков при сдвиге в плоскости листа определены в процессе испытаний 125 плоских образцов, изготовленных из четырех марок углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$. Установлено, что ни один из рассмотренных в данной работе стандартизованных методов не обеспечивает равномерного распределения сдвиговых напряжений в рабочей зоне испытываемого образца. Значения прочности, наиболее близкие к прогнозируемым, получены на образцах, выполненных по стандарту ASTM D7078 (ГОСТ Р 57207) на основе метода перекашивания пластины с V-образным вырезом. В то же время метод перекашивания пластины в шарнирном четырехзвеннике (ГОСТ 24778, ASTM D2719) и метод Иосипеску (ASTM D5379, ГОСТ Р 56799) однозначно не могут быть использованы для достоверного определения прочностных характеристик при сдвиге современных углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$.

Ключевые слова: углепластики; сдвиг в плоскости листа; напряженно-деформированное состояние; методы и стандарты испытаний.

**ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ADVANCED METHODS
OF IN-PLANE SHEAR TESTING OF HIGH-STRENGTH CFRP SPECIMENS****© Alexei G. Popov*, Nikolai V. Matyushevsky, Natalya G. Lisachenko**

JSC A. G. Romashin ORPE "Tekhnologiya", 15, Kievskoye sh., Obninsk, Kaluga oblast', 249031, Russia;

*e-mail: ag-popov@yandex.ru

Received April 12, 2022. Revised June 28, 2022. Accepted July 28, 2022.

The mechanical testing performed to determine shear characteristics of advanced carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) can involve significant problems. First of all, this is due to the difficulties in providing uniform distribution of shear stresses in the working area of the specimens, particularly in determining the strength characteristics of advanced polymer composite materials based on high-modulus or high-strength carbon fibers with the $\pm 45^\circ$ layup, where the material properties depend not only on the matrix

but also on the fiber properties, unlike unidirectional composites. In addition, one can mention a large number of shear test methods and related standards of in-plane shear testing. At the same time, the results of the tests performed according to various standards generally do not comply with each other. In this study the analysis of CFRP shear characteristics obtained from various test methods was performed. The calculated and experimental data of stress-strain distribution for various specimen types were obtained. The experimental results of determining the strength and elastic characteristics of CFRP in the in-plane shear were obtained during the testing of 125 flat specimens made of four brands of CFRP reinforced with the $\pm 45^\circ$ plies. None of the standard methods discussed in this study was found to provide uniform distribution of shear stresses in the working area of the test specimen. The strength values closest to the predicted ones were obtained from the specimens made according to ASTM D7078 (GOST R 57207) based on the method of V-notch plate distortion. At the same time, the method of plate distortion in the four-bar linkage (GOST 24778, ASTM D2719) and the Iosipescu method (ASTM D5379, GOST R 56799) cannot definitely be used to reliably determine the shear strength characteristics of advanced CFRP reinforced with the $\pm 45^\circ$ plies.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastics; in-plane shear; stress-strain state; test methods and standards.

Введение

Как отмечено в работе [1], слабое сопротивление сдвигу, особенно в плоскостях, где свойства материала определяются матрицей, является недостатком армированных пластиков со слоистой структурой. Для ряда конструкций касательные напряжения, несмотря на их малость, могут оказывать существенное влияние на несущую способность и быть причиной разрушения конструкций.

Не случайно значения прочности и модуля сдвига, как правило, включаются в техническую документацию в качестве показателей качества изготовления современных композиционных конструкций. В связи с этим достоверное определение характеристик сдвига в плоскости листа имеет важное прикладное значение. Однако в процессе экспериментального определения сдвиговых характеристик композиционных материалов, в том числе современных высокопрочных и высокомодульных углепластиков, возникают существенные проблемы.

В частности, во многих исследованиях [1 – 5] отмечено наличие большого разнообразия сдвиговых испытательных методов, разработанных и используемых в течение последних 40 – 50 лет. При этом подчеркнуто, что количество методов испытаний на сдвиг значительно больше, чем для других типов механических испытаний композитов, включая базовые — растяжение и сжатие.

Только при испытаниях образцов на сдвиг в плоскости листа используют семь известных методов нагружения. Это обстоятельство привело к разработке большого числа различных стандартов — ASTM, EN, ГОСТ и других (см. таблицу). Каждый из этих стандартов, даже для одного метода нагружения, имеет свои особенности, в частности, предполагает использование различных по конфигурации и размерам образцов.

Опыт экспериментального определения характеристик ПКМ при сдвиге показывает, что в данном случае многообразие не является положительным фактором, поскольку результаты испытаний, выполненных по различным стандартам, на практике не всегда соответствуют друг другу, что затрудняет анализ свойств материала и вызывает проблемы при проектировании и прочностных расчетах композиционных конструкций. В то же время существует определенный дефицит исследований, в которых комплексно оцениваются достоинства и недостатки различных методов испытаний на сдвиг образцов из современных углепластиков и сравниваются между собой результаты испытаний, выполненных по различным стандартам [2, 6].

Необходимо отметить, что одна из причин большого количества разработанных методов и стандартов заключается в трудности реализации «чистого» сдвига, а также равномерного распределения сдвиговых напряжений в рабочей части образцов. Анизотропия свойств и особенности строения слоистых композиционных материалов способствуют, как правило, существенной неоднородности напряженно-деформированного состояния в рабочей части образцов и наличию концентраторов напряжений на границе образца с испытательной оснасткой. Эта проблема усугубляется при экспериментальном определении прочностных характеристик современных ПКМ на основе высокомодульных или высокопрочных углеродных волокон. Как отмечено в работах [4, 5, 7], для испытаний композитных материалов с укладкой $[\pm 45^\circ]_S$, где характеристики материала зависят от свойств не только матрицы, но и волокон (в отличие от однонаправленных образцов), а сдвиговая прочность в несколько раз превышает межслойную, существующие методы испытаний на сдвиг не гарантируют разрушение образцов в рабочей зоне от чистого сдвига в плоскости слоев.

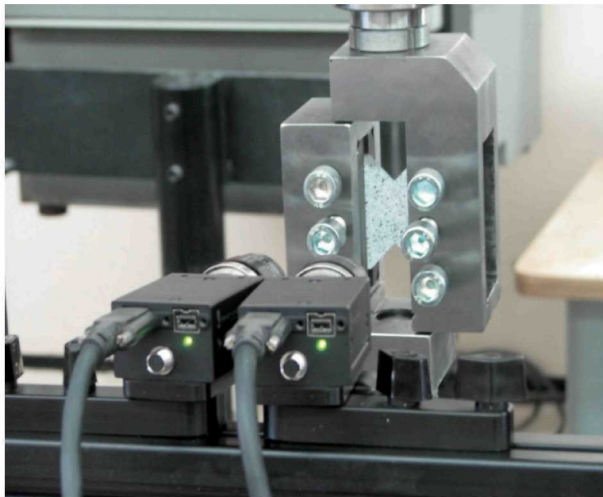


Рис. 1. Процесс измерения деформаций оптической системой VIC-3D

Fig. 1. Process of strain measurement with the VIC-3D optical system

Цель работы — проведение сравнительного анализа значений сдвиговых характеристик современных ПКМ на основе углеродных волокон, полученных в результате применения различных методов испытаний. Определены стандарты, позволяющие максимально реализовать в образце состояние «чистого» сдвига, когда влиянием других компонент нормальных и касательных напряжений можно пренебречь, а также обеспечивающие наиболее равномерное распределение сдвиговых напряжений в рабочей части образца.

Реализация поставленной цели требовала определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в образцах. На начальном этапе проводили расчет НДС для выбора рациональных параметров образцов и исследовали влияние геометрических размеров рабочей зоны образца в

рамках применяемого стандарта, необходимость наличия накладок, их толщины и жесткости материала на распределение напряжений. Для этого был использован метод конечных элементов (МКЭ) в среде NX/Nastran, при этом при моделировании НДС исследуемых образцов и защитных накладок выбран твердотельный объемный элемент SOLID.

Расчетные значения прочностных и упругих характеристик слоистого пакета, имеющего схему армирования, отличающуюся от однонаправленной, находили по свойствам монослоя на основе классической теории ламинатов [8, 9]. При этом на основании критерия прочности Хилла определяли комбинацию средних напряжений, при которой в слое происходит разрушение матрицы от поперечных и сдвиговых напряжений (значения напряжений потери монолитности слоистого пакета). При разрыве волокон монослой считается полностью разрушенным и несущая способность пакета исчерпывается (значения предела прочности слоистого пакета).

Модуль сдвига определяли при помощи тензорезисторов, наклеенных в центре образца под углом 45° к главным осям координат, а для измерения распределения деформаций и перемещений на поверхности образцов методом численной корреляции цифровых изображений использовали оптическую систему VIC-3D (рис. 1).

Оптические методы измерения деформаций на основе численной корреляции изображения — наиболее эффективный инструмент для отработки методик прочностных испытаний образцов и конструкций, обеспечивающий визуализацию с высокой разрешающей способностью области распределения деформаций по всему участку рабочей зоны образцов, а также фиксацию процесса изменений деформаций в процессе нагружения [10 – 13].

Классификация наиболее широко применяемых методов и стандартов для экспериментального определения прочностных и упругих характеристик ПКМ при сдвиге в плоскости листа

Classification of the most widely applied methods and standards for experimental definition of strength and elastic characteristics of CFRP in the in-plane shear

Методы испытаний	Стандарты
Перекашивание пластины в четырехзвеннике (Picture Frame Shear)	ГОСТ 24778, ASTM D2719, DIN 53399-2
Перекашивание пластины с V-образным вырезом (метод Иосипеску — Iosipescu Shear)	ГОСТ Р 567990, ASTM D5379M
Перекашивание одной узкой полосы (Two-Rail Shear)	ASTM D4255, JIS K7079
Перекашивание двух узких полос (Three-Rail Shear)	ГОСТ Р 50578, ASTM D4255, JIS K7079
Перекашивание пластины с V-образным вырезом (V-Notch Rail Shear test)	ASTM D7078, ГОСТ Р 57207, JIS K7079-2
Растяжение анизотропной полосы, армированной слоями ±45° (±45° Tensile Shear)	ГОСТ 32658, ASTM D3518, ISO 14129, prEN 6031, DIN 65466, SACMA SRM 7, JIS K7079
Кручение пластины с четырьмя точками приложения (Four-Point Shear)	ASTM D3044, ISO 15310, JIS K 7079

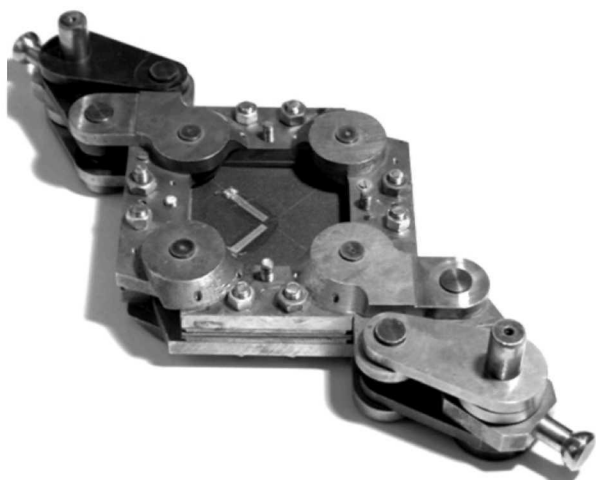


Рис. 2. Шарнирный четырехзвенник с образцом

Fig. 2. Four-bar linkage with the specimen

Объектом исследования являлись плоские углепластиковые образцы толщиной от 1,3 до 4,1 мм со схемой армирования $[\pm 45^\circ]_S$, отформованные в автоклаве из препрегов П-4УТ 3692, П-4УТ 3750, Porcher-3692/ВСЭ 20 и ВКУ-25.

Экспериментальные результаты определения прочностных и упругих характеристик углепластиков при сдвиге в плоскости листа получали с использованием различных наиболее широко применяемых на практике стандартов испытаний (см. таблицу).

Метод перекашивания пластины в четырехзвеннике (Picture Frame Shear)

Метод позволяет экспериментально определять сдвиговые характеристики композитов путем перекашивания образца с квадратным рабочим участком, жестко закрепленного в шарнирной раме (рис. 2).

Способ нагружения при помощи шарнирного четырехзвенника — первый стандартизованный метод экспериментального определения сдвиговых характеристик композитов (ASTM D2719, DIN 53399-2, ГОСТ 24778). Этот метод был наиболее востребован на ранних этапах исследований композиционных материалов, когда отсутствовали другие методы испытаний на сдвиг [14]. Его популярность резко снизилась с введением в экспериментальную практику метода перекашивания одной или двух узких полос и метода Иосипеску. В работах [1, 14, 15] подробно описаны достоинства и недостатки первого метода. Отмечается наличие неравномерного НДС в рабочей части образца с явно выраженной концентрацией деформаций и напряжений в углах. В зонах кромок рабочей части образца, помимо касательных, присутствуют и нормальные напряжения.

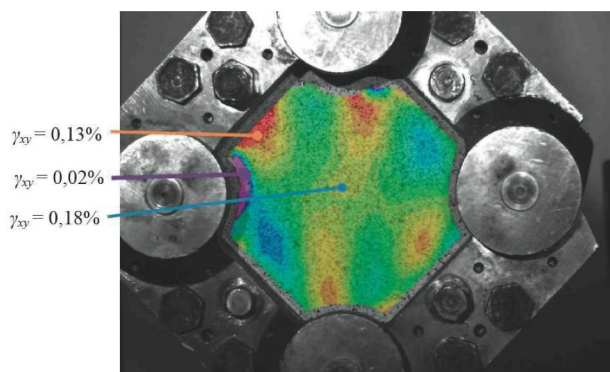


Рис. 3. Распределения сдвиговых деформаций в образце с размером рабочей зоны $a = 100$ мм, полученные оптической системой VIC-3D

Fig. 3. Distribution of shear strains in the specimen with the size of the working area $a = 100$ mm determined by the VIC-3D optical system



Рис. 4. Характер разрушения образца после испытаний в четырехзвеннике

Fig. 4. Mode of the specimen failure after the testing in the four-bar linkage

Образец, нагруженный таким образом, не находится в состоянии чистого сдвига, и значения модуля не могут быть определены с достаточной степенью достоверности из-за неоднородности распределения сдвиговых напряжений в рабочей зоне. Как отмечено в работе [16], условием чистого сдвига служит не равенство деформаций, а равенство по модулю растягивающих и сжимающих напряжений вдоль диагоналей, поэтому данный метод корректен только в случае равенства модулей упругости в направлениях диагоналей квадрата, что практически нереализуемо из-за различия жесткостных характеристик углепластиков при растяжении и сжатии.

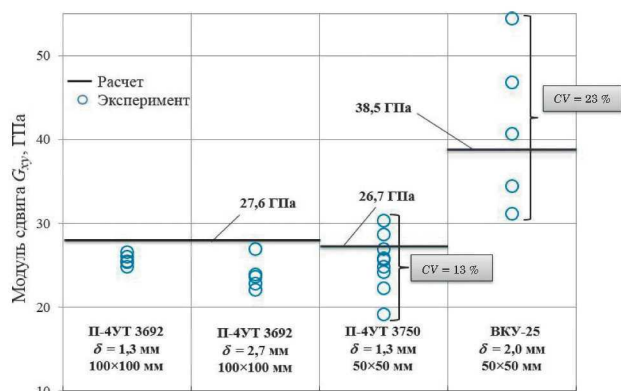


Рис. 5. Результаты определения модуля сдвига в шарнирном четырехзвеннике (ГОСТ 24778)

Fig. 5. Results of determining the shear modulus in the four-bar linkage (GOST 24778)

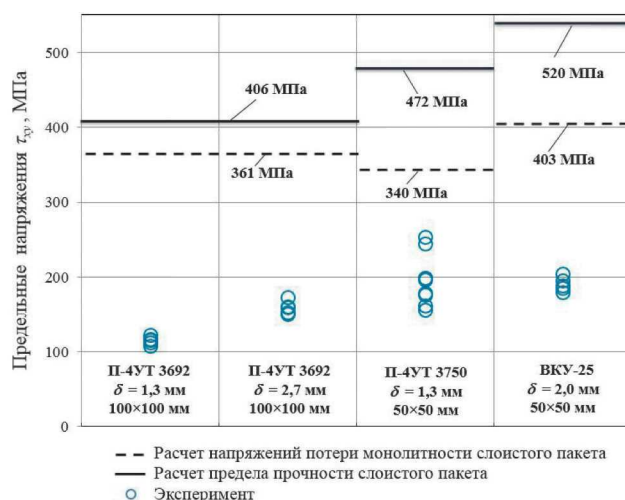


Рис. 6. Результаты определения сдвиговой прочности в шарнирном четырехзвеннике (ГОСТ 24778)

Fig. 6. Results of determining the shear strength in the four-bar linkage (GOST 24778)

Были проведены испытания образцов на определение сдвиговых свойств углепластиков П-4УТ 3692, П-4УТ 3750 и ВКУ-25 со схемами армирования $[\pm 45^\circ]_6$ и $[\pm 45^\circ]_{12}$. Образцы изготавливали согласно ГОСТ 24778 с размерами рабочей зоны $a = 50$ и $a = 100$ мм.

Полученные при нагружении значения сдвиговых деформаций подтвердили неоднородность НДС для данного типа образцов и наличие концентрации сдвиговых деформаций на кромках образца и особенно — в углах рабочей зоны (рис. 3).

Разрушение таких образцов, как правило, происходило с образованием диагональной трещины, развитие которой начиналось из угла рабочей зоны (рис. 4).

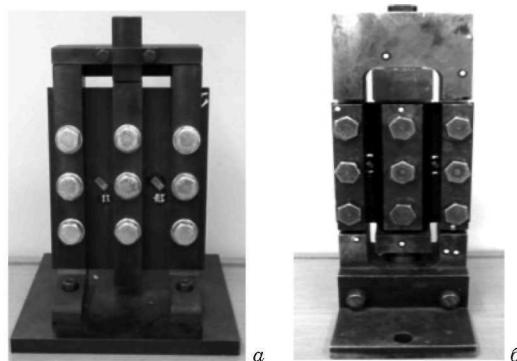


Рис. 7. Приспособления и образцы для испытаний на сдвиг перекашиванием двух узких полос: *a* — по ASTM D4255; *б* — по ГОСТ Р 50578

Fig. 7. Fixtures and specimens for shear testing by distortion of two narrow strips: *a* — according to ASTM D4255; *b* — according to GOST R 50578

В результате испытаний образцов из углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$, получены значения модуля сдвига и предела прочности (рис. 5 и 6).

Следует отметить, что неоднородность НДС в рабочей зоне в процессе нагружения образцов в четырехзвеннике приводила к преждевременному разрушению при напряжениях материала, существенно меньших не только расчетных значений предела прочности слоистого пакета, но и напряжений потери монолитности. Неизбежная неоднородность в рабочей зоне образца также может быть связана с неравномерной передачей усилий растяжения или сжатия на образец при проведении испытаний. При определении модуля сдвига в ряде случаев наблюдался значительный разброс экспериментальных значений, при этом коэффициент вариации (CV) для отдельных партий образцов превышал 10 %.

Таким образом, метод перекашивания пластины в шарнирном четырехзвеннике не может быть использован для достоверного определения сдвиговых характеристик современных углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$.

Перекашивание двух узких полос (Three-Rail Shear)

Данный метод предполагает крепление плоского прямоугольного образца болтами по трем направляющим. Образец нагружается по средней направляющей приспособления, вследствие чего в его двух рабочих областях, представляющих собой относительно узкие полосы, возникают сдвиговые напряжения τ_{xy} . Нагрузка передается через нагружающий блок приспособления, соединенный со средней полосой. При проведении испытаний по этому методу чаще всего используют два стандарта: ГОСТ Р 50578 и ASTM D4255 (ме-

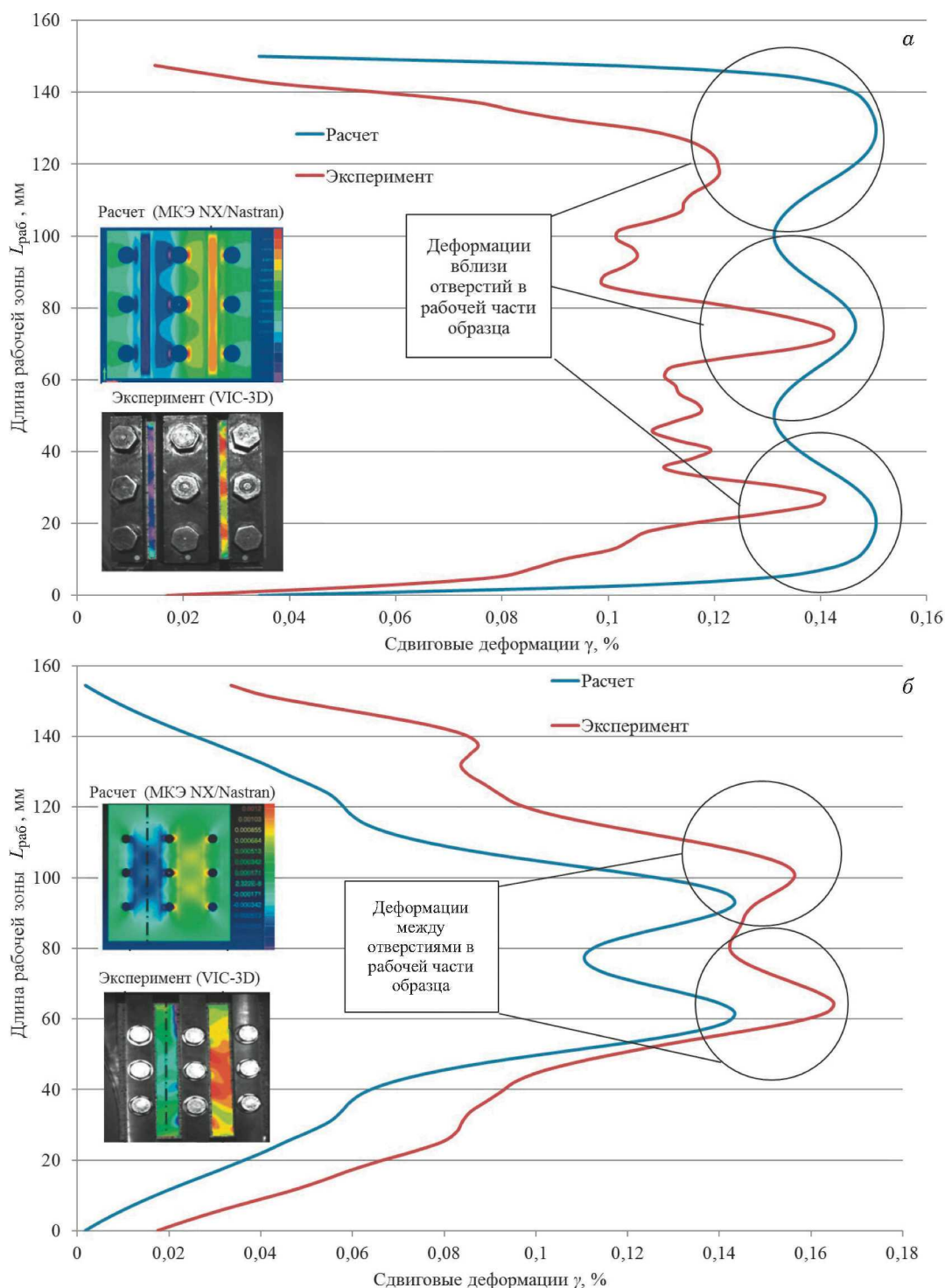


Рис. 8. Распределение сдвиговых деформаций по длине рабочей зоны образца согласно ГОСТ Р 50578 (а) и ASTM D4255 (б)

Fig. 8. Distribution of shear strains along the length of the specimen working area according to GOST R 5057 (a) and ASTM D4255 (b)

тод В). В этих стандартах схемы нагружения одинаковы (рис. 7), а размеры образцов отличаются друг от друга.

Если в ASTM D4255 размеры перекашиваемых полос, которые являются рабочим участком

образца, составляют 160×25 мм, то в стандарте ГОСТ Р 50578 — 150×10 мм. Кроме того, ГОСТ Р 50578 однозначно предписывает наличие стеклопластиковых накладок в местах болтового соединения испытательной оснастки с об-

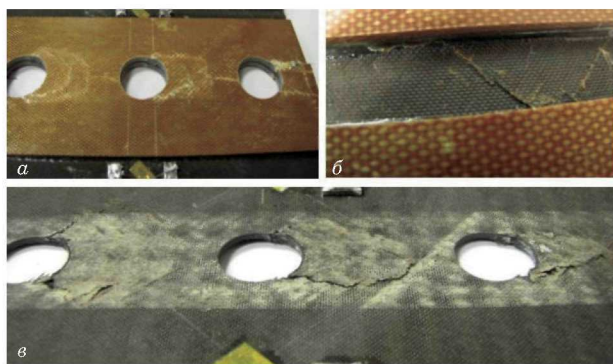


Рис. 9. Виды разрушения образцов, испытанных по методу перекашивания двух узких полос: *a* — смятие центральных крепежных отверстий образца по ГОСТ Р 50578; *b* — растрескивание материала в рабочей области образца по ГОСТ Р 50578; *c* — смятие и растрескивание центральных крепежных отверстий образца по ASTM D4255

Fig. 9. Types of the specimen failure tested by distortion of two narrow strips: *a* — bearing of the central fixing openings of test specimen in accordance with GOST R 50578; *b* — cracking of material in gage area of test specimen in accordance with GOST R 50578; *c* — bearing and cracking of the central fixing openings of test specimen on ASTM D4255

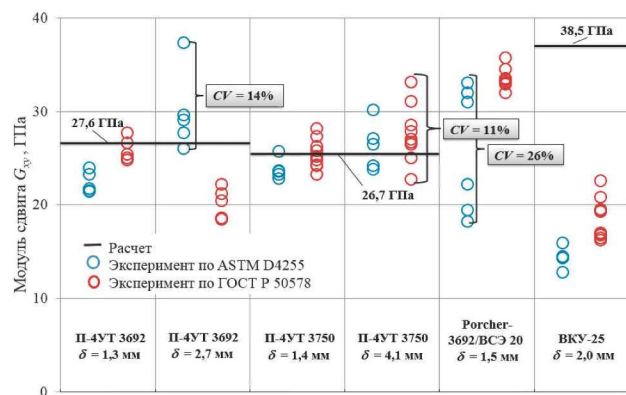


Рис. 10. Результаты определения модуля сдвига перекашиванием двух узких полос

Fig. 10. Results of determining the shear modulus by distortion of two narrow strips

разцом, а в ASTM D4255 они не предусмотрены. Учитывая негативное влияние отверстий болтового крепежа на равномерность распределения сдвиговых деформаций в рабочей зоне образца [17, 18], отсутствие накладок может существенно сказаться на результатах испытаний.

Проведенный анализ методом конечных элементов показал, что в рабочей зоне образцов (перекашиваемые полосы) не наблюдается однородного распределения сдвиговых напряжений и деформаций, что затем было подтверждено экспериментальными измерениями деформаций с помощью оптической установки VIC-3D (рис. 8). Кроме того, в процессе испытаний отдельных об-

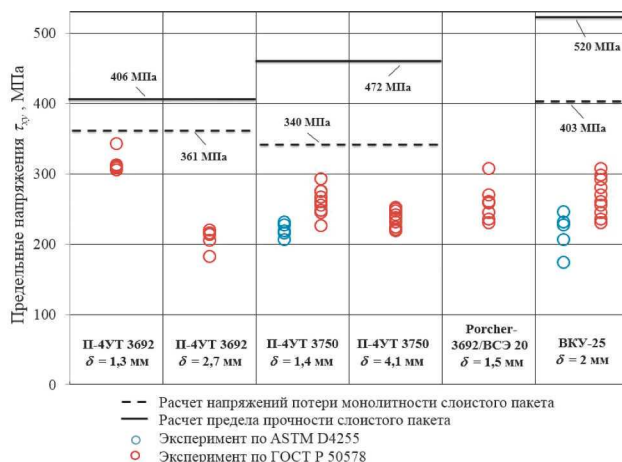


Рис. 11. Результаты определения сдвиговой прочности перекашиванием двух узких полос

Fig. 11. Results of determining the shear strength by distortion of two narrow strips

разцов происходило частичное разрушение в центральных крепежных отверстиях в виде смятия и растрескивания материала, что свидетельствует о значительном влиянии этих отверстий на распределение сдвиговых деформаций и напряжений в рабочей зоне образцов (рис. 9).

Следует отметить, что неоднородность сдвиговых деформаций и напряжений в рабочей зоне образцов, вызванная наличием концентраторов напряжений от крепежных отверстий, существенно сказалась на результатах экспериментального определения модуля и предела прочности углепластиков при сдвиге в плоскости листа.

Полученные при испытаниях образцов из различных углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$, значения модуля сдвига имели значительный разброс, при этом величина коэффициента вариации в одной из партий образцов достигала 26 %, что является неприемлемым для достоверного определения этого параметра (рис. 10).

Экспериментальные значения разрушающих напряжений углепластиков так же, как и в случае испытаний по методу перекашивания пластины в четырехзвеннике (Picture Frame Shear), были существенно ниже не только расчетных пределов прочности слоистого пакета, но и напряжений потери монолитности (рис. 11). При этом для всех исследуемых углепластиков результаты определения сдвиговой прочности при испытаниях образцов, изготовленных по ГОСТ Р 50578, были существенно выше, чем при испытаниях образцов, полученных по ASTM D4255.

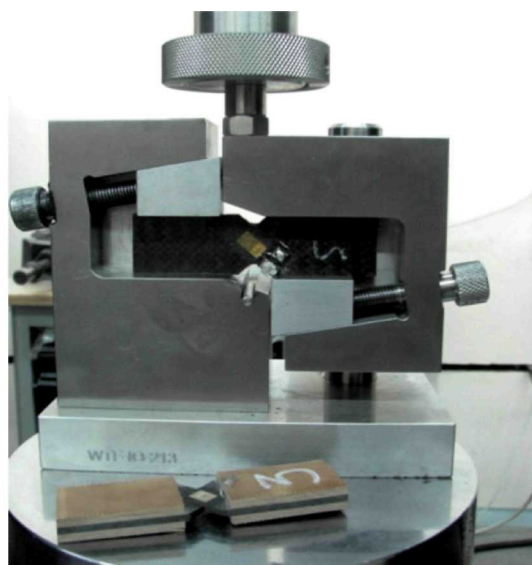


Рис. 12. Приспособление Wyoming shear-test fixture с образцом согласно ASTM D5379

Fig. 12. Wyoming shear-test fixture with the specimen according to ASTM D5379

Перекашивание пластины с V-образным вырезом — метод Иосипеску (Iosipescu Shear)

Метод предложен в 1967 г. [19] и сначала использовался для определения сдвиговой прочности изотропных и однородных материалов, таких как металлы. Испытательный образец — прямоугольная пластина с расположенными на противоположных торцах V-образными вырезами под углами 90° . С середины 1980-х годов [20, 21] этот метод был адаптирован для испытаний образцов из композиционных материалов и разработана соответствующая оснастка для испытаний Wyoming shear-test fixture (рис. 12), что способствовало стандартизации метода (ASTM D5379–93). На сегодняшний день существуют несколько стандартов на основе метода Иосипеску, в том числе ASTM D5379 и ГОСТ Р 56799–2015, которые наиболее широко используют в практике испытаний композитов при сдвиге в плоскости листа.

Тем не менее во многих исследованиях установлено, что данный метод испытаний далеко не для всех композиционных материалов и схем армирования слоев обеспечивает равномерное распределение сдвиговых напряжений в рабочей части образца [18, 22]. В [23] указано на наличие межслоевых деформаций в образце, которые могут оказывать критическое влияние на характер разрушения. Отмечено [24], что воздействие испытательной оснастки вызывает боковую неустойчивость и возникновение нежелательных

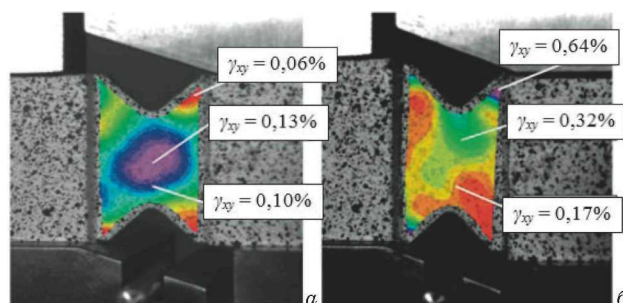


Рис. 13. Распределение сдвиговых деформаций в образце из углепластика ВКУ-25 по ASTM D5379 при нагрузках: а — $P = 0,69$ кН ($P = 0,11P_{\text{раз}}$); б — $P = 4,40$ кН ($P = 0,70P_{\text{раз}}$)

Fig. 13. Distribution of shear strains in the specimen from VKU-25 CFRP according to ASTM D5379 at the following loads: а — $P = 0.69$ kN ($P = 0.11P_{\text{failure}}$); б — $P = 4.40$ kN ($P = 0.70P_{\text{failure}}$)

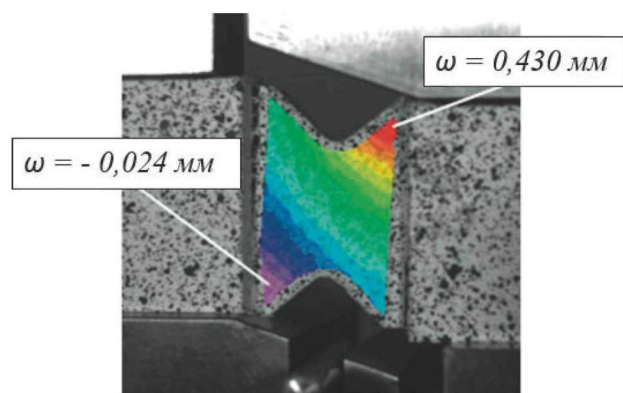


Рис. 14. Распределение перемещений в образце в трансверсальной плоскости из углепластика ВКУ-25 по ASTM D5379 при нагрузке $P = 4,40$ кН ($P = 0,70P_{\text{раз}}$)

Fig. 14. Distribution of displacements in the specimen from VKU-25 CFRP in the transversal plane according to ASTM D5379 at the load $P = 4.40$ kN ($P = 0.70P_{\text{failure}}$)

эффектов в процессе нагружения образца. В исследованиях, выполненных в Wyoming Test Fixtures, Inc. [25], рекомендуется использовать метод Иосипеску только для определения сдвиговых свойств однонаправленного композита. Для разрушения композиционных образцов, армированных под различными углами, с более высокими сдвиговыми прочностными свойствами требуется большая нагрузка, что может привести к разрушению торцов в зоне воздействия испытательной оснастки на образец.

В данной работе в процессе испытаний образцов, изготовленных по стандарту ASTM D5379, из углепластиков П-4УТ 3692, П-4УТ 3750 и ВКУ-25 со схемами армирования $[\pm 45^\circ]_6$; $[\pm 45^\circ]_{12}$ и $[\pm 45^\circ]_{18}$ установлено, что на начальном этапе их нагружения при относительно небольших значениях нагрузки максимальные сдвиговые де-



Рис. 15. Характер разрушения образца после испытания по ASTM D 5379

Fig. 15. Mode of the specimen failure after the testing according to ASTM D 5379

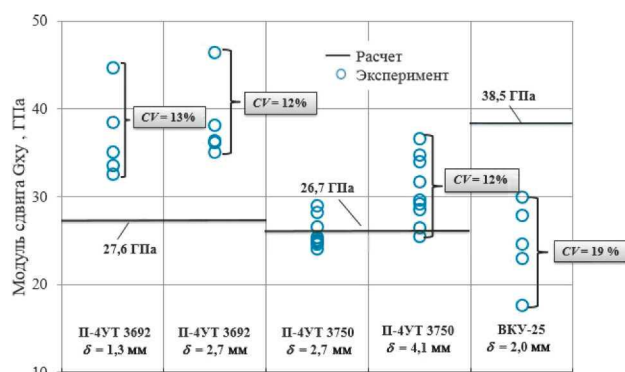


Рис. 16. Результаты определения модуля сдвига по методу Иосипеску

Fig. 16. Results of determining the shear modulus by the Iosipescu method

формации и соответственно напряжения возникали в рабочем участке, т.е. в области между V-образными вырезами. Однако с ростом нагрузки зона максимальных деформаций сместилась в углы V-образных вырезов, примыкающих к торцам образца, как показано на рис. 13. Кроме того, воздействие испытательной оснастки приводило к «скручиванию» образцов, что можно проследить по распределению перемещений в трансверсальной плоскости (рис. 14), с последующим расслаиванием материала в области торцов. Характер разрушения образцов представлен на рис. 15.

Неоднородность НДС при сдвиге в рабочей части образцов из углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$, а также выявленная оптическим методом концентрация напряжений в углах переходной зоны вблизи нагрузочных пластин существенно повлияли на результаты испытаний по методу Иосипеску. Экспериментальные значения модуля и предела прочности показаны на рис. 16 и 17.

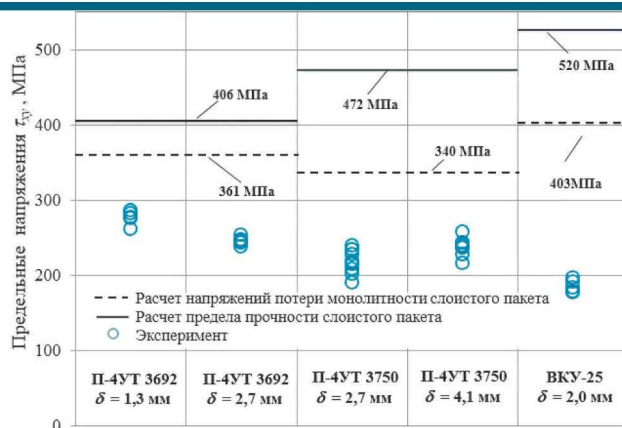


Рис. 17. Результаты определения прочности сдвига по методу Иосипеску

Fig. 17. Results of determining the shear strength by the Iosipescu method

Значения модуля сдвига G_{xy} , определенные с использованием тензорезисторов, имеют большой разброс. При этом средние его значения для партий образцов из препрегов П-4УТ 3692 и П-4УТ 3750 существенно превышают расчетные, а средний модуль образцов из углепластика ВКУ-25 толщиной 2,0 мм на 36 % ниже расчетного значения.

Неоднородность НДС и выявленная концентрация напряжений в углах переходной зоны углепластиковых образцов со схемами армирования $[\pm 45^\circ]_S$ существенно повлияли на результаты экспериментального определения предела прочности τ_{xy} по стандарту ASTM D5379. Полученные значения разрушающих сдвиговых напряжений были значительно ниже не только расчетных значений предела прочности слоистого пакета, но и напряжений потери монолитности (см. рис. 17).

Перекашивание пластины с V-образным вырезом — ASTM D7078 (V-Notch Rail Shear test)

Как отмечено выше, применение метода Иосипеску для испытаний на сдвиг композитов ограничивает величина нагрузки, которая прикладывается через опорные торцы образца и может приводить к локальным разрушениям. Для однонаправленных композитов сдвиговая прочность в плоскости имеет относительно низкие значения ($\tau_{xy} < 100$ МПа), поэтому нагружение торца образца из такого материала обычно не представляет никаких проблем. Если композиционные материалы армированы под различными углами, например, $\pm 45^\circ$, их сдвиговая прочность значительно выше ($\tau_{xy} = 400 - 500$ МПа) и провести корректные испытания, используя способ приложения нагрузки на торец, часто бывает невозможно.

Стандарт ASTM D7078 на основе метода перекашивания пластины с V-образной проточкой — последний из ASTM для определения прочности и жесткости композиционных материалов при сдвиге. По существу он представляет собой комбинацию двух методов: Иосипеску — Iosipescu Shear (ASTM D5379) и «перекашивание одной узкой полосы» — Two-Rail Shear (ASTM D4255). При этом сделана попытка объединить достоинства и устранить недостатки каждого из этих методов [26, 27].

Разработчики метода преднамеренно увеличили ширину образца по сравнению с образцом по методу Иосипеску (ASTM D5379M), чтобы обеспечить большую зону равномерных сдвиговых напряжений между проточками. Нагрузка передается через боковые поверхности так же, как и в стандарте ASTM D4255. Захватное устройство предусматривает две пары прижимных пластин и фиксирующие винты. В то же время отверстия в данном образце отсутствуют, что устраняет вероятность возникновения соответ-

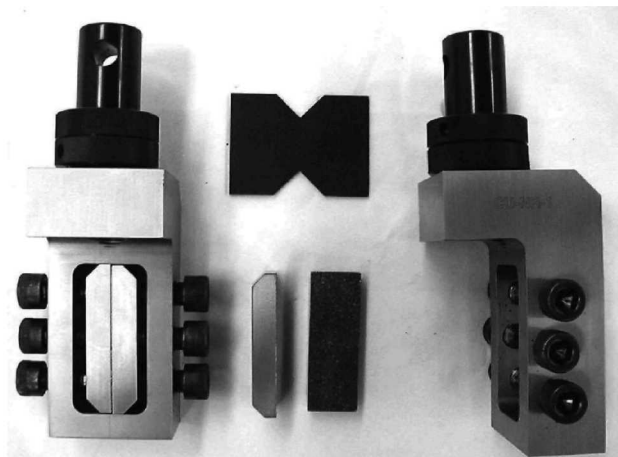


Рис. 18. Испытательная оснастка и образец по стандарту ASTM D 7078

Fig. 18. Test tooling and the specimen according to ASTM D 7078

ствующих концентраций напряжений. Образец и оснастка для испытаний показаны на рис. 18.

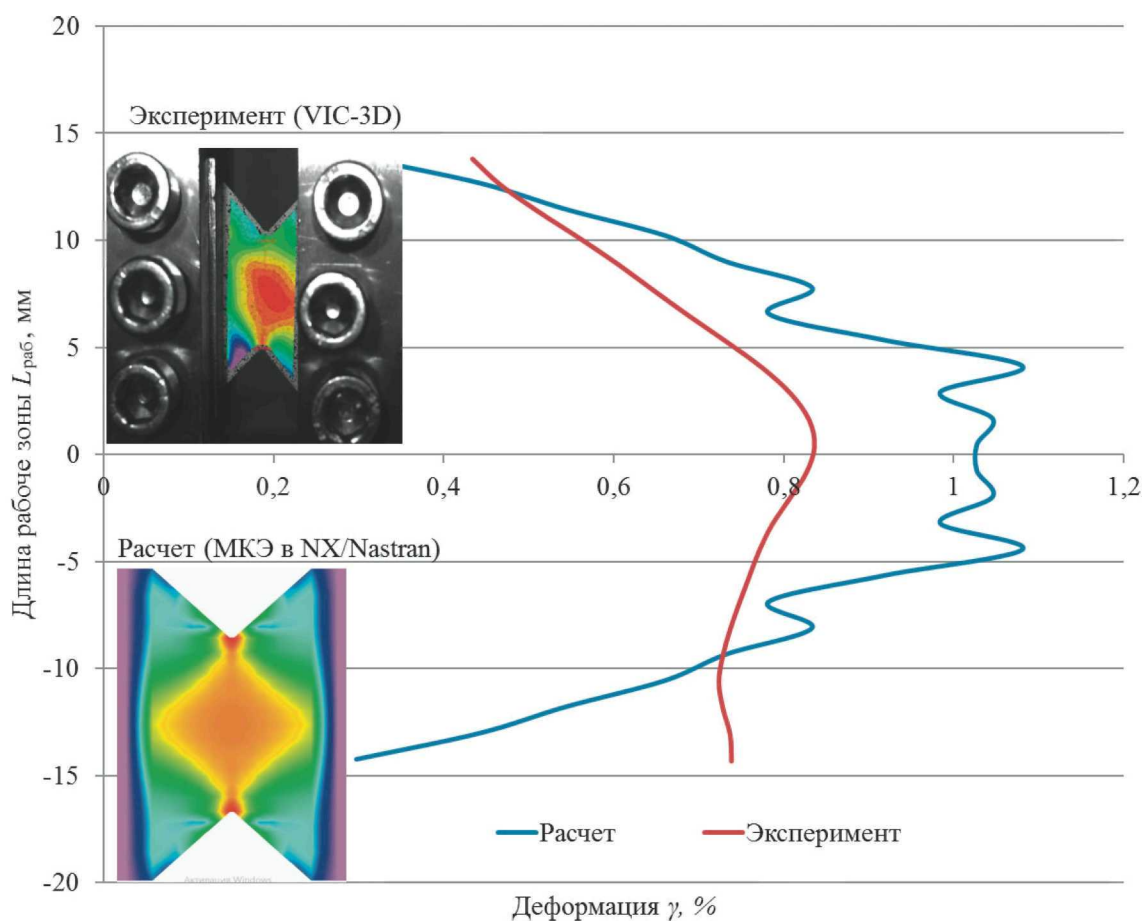


Рис. 19. Распределение сдвиговых деформаций по длине рабочей зоны образца, изготовленного по стандарту ASTM D7078 из углепластика ВКУ-25

Fig. 19. Distribution of shear strains along the length of the working area of the specimen fabricated from VKU-25 CFRP according to ASTM D7078

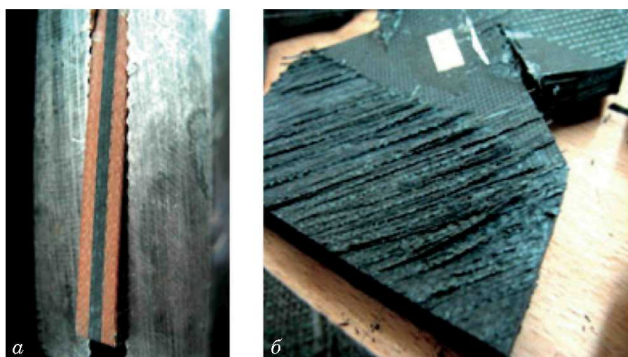


Рис. 20. Виды разрушения образцов, испытанных по методу перекашивания пластины с V-образным вырезом: *a* — «выползание» образца из зажимных губок; *б* — характер разрушения образца без защитных накладок

Fig. 20. Failure types of the specimens tested by the V-notch plate distortion: *a* — “sliding” of the specimen out of the clamping jaws; *b* — failure mode of the specimen without edge molding

В ряде работ, например, [25, 28, 29] утверждается, что использование данного образца с V-образной проточкой уменьшает концентрации напряжений около нагрузочных пластин и позволяет достичь относительно однородного распределения сдвиговых напряжений в рабочей зоне даже при нагружении образцов из композитов с более высокими значениями сдвиговой прочности.

Результаты расчета и экспериментального определения НДС образцов, изготовленных по стандарту ASTM D7078 из углепластиков Porcher-3692/BCЭ 20 и ВКУ-25 и армированных слоями $\pm 45^\circ$, полученные в данной работе, показали, что максимальные сдвиговые деформации возникали в рабочей зоне образца между проточками (рис. 19). Однако в процессе испытаний при достижении нагрузки, близкой к разрушающей, происходило «выползание» образца из зажимных губок из-за наличия крутящего момента в плоскости образца (рис. 20, *a*). В этом случае зона максимальных деформаций могла смещаться к одному из краев рабочего участка (вершине V-образного выреза), в то время как на противоположной стороне рабочего участка фиксировались минимальные деформации. При этом разрушение образцов, как правило, происходило в виде трещины, распространяющейся от вершины V-образного выреза, как показано на рис. 20, *б*.

Полученные в результате испытаний по стандарту ASTM D7078 образцов из углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$, значения модуля и предела прочности показаны на рис. 21. Следует отметить, что неравномерность распределения НДС в рабочей зоне образцов была заметно ниже, чем при испытаниях по другим стандартам, но тем не менее негативно влияла на ре-

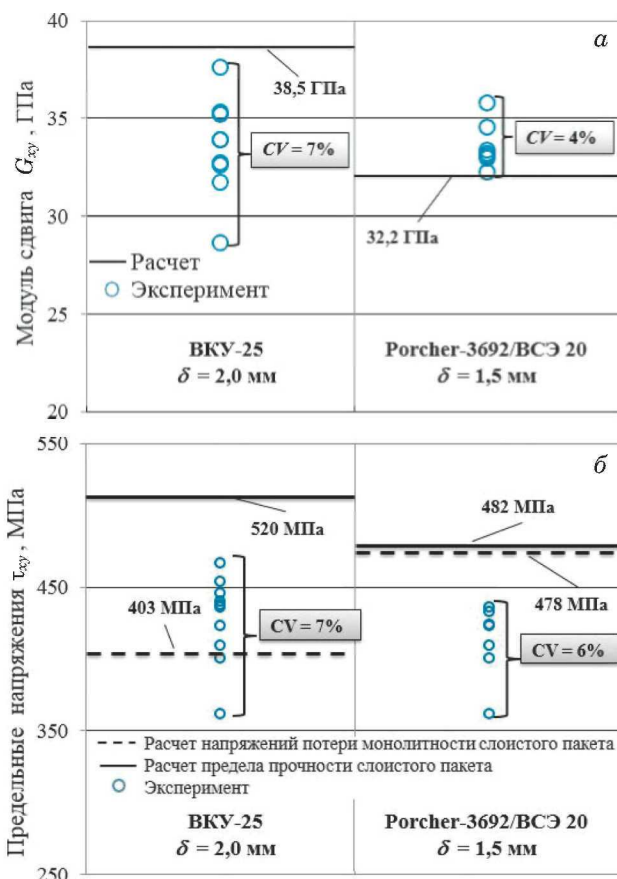


Рис. 21. Результаты определения модуля сдвига (*a*) и прочности сдвига (*б*) по ASTM D 7078

Fig. 21. Results of determining the shear modulus according (*a*) and strength according (*b*) to ASTM D 7078

зультаты экспериментального определения модуля и предела прочности углепластиков при сдвиге в плоскости листа.

Сравнительный анализ результатов экспериментального определения различными методами сдвиговых характеристик углепластиков

Выполненный в данной работе значительный объем испытаний образцов, изготовленных из четырех материалов в соответствии с требованиями наиболее распространенных стандартов, позволил провести сравнительный анализ достоверности различных методов определения прочности на сдвиг в плоскости листа углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$.

На рис. 22 представлены результаты экспериментального определения сдвиговой прочности углепластиков различными методами, которые нормализованы к расчетным значениям предела прочности слоистого пакета (значениям предельных напряжений, при которых происходит разрыв волокон хотя бы в одном из слоев, что

считается полным исчерпанием несущей способности слоистого пакета).

Проведенный анализ влияния методов испытаний и соответствующих им стандартов на достоверность определения сдвиговых свойств высокомолекулярных углепластиков показал, что значения прочности, наиболее близкие к прогнозируемым, получены на образцах, выполненных по стандарту ASTM D7078 на основе метода перекашивания пластины с V-образной проточкой. В то же время методы перекашивания пластины в шарнирном четырехзвеннике (ГОСТ 24778; ASTM D 2719) и Иосипеску (ASTM D 5379 и ГОСТ Р 56799) однозначно не могут быть использованы для достоверного определения прочностных характеристик при сдвиге современных углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$.

Выводы

Проведены испытания по различным методам на сдвиг в плоскости листа 125 плоских образцов, изготовленных из четырех углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$.

Установлено, что ни один из рассмотренных в данной работе стандартизованных методов не обеспечивает равномерного распределения сдвиговых напряжений в рабочей зоне испытываемого образца. Более того, в процессе испытаний всеми используемыми методами выявлены разного рода зоны концентраций напряжений: зоны, прилегающие к отверстиям; зоны контакта с металлической испытательной оснасткой при передаче усилий на образец; зоны, прилегающие к вершинам V-образной проточки. Величины деформаций и напряжений в таких зонах, как правило, существенно превышали однородное НДС в рабочей зоне, что приводило к преждевременному разрушению образцов. В результате этого полученные значения разрушающих сдвиговых напряжений углепластиковых образцов со схемами армирования $[\pm 45^\circ]_s$, определенные в процессе испытаний, часто были существенно ниже не только расчетных значений предела прочности, но и напряжений потери монолитности слоистого пакета, прогнозируемых по свойствам монослоя на основе классической теории ламинатов.

Неоднородность НДС в рабочей зоне образцов существенно влияла и на точность определения упругих характеристик при сдвиге. В связи с тем, что модуль сдвига определяли при помощи тензорезисторов, покрывающих сравнительно небольшую площадь образца, область измерений могла оказаться как в зоне максимальных, так и минимальных деформаций. Вследствие этого значения модуля сдвига, определенные с использованием тензорезисторов, характеризовались большим разбросом. При этом средние значения

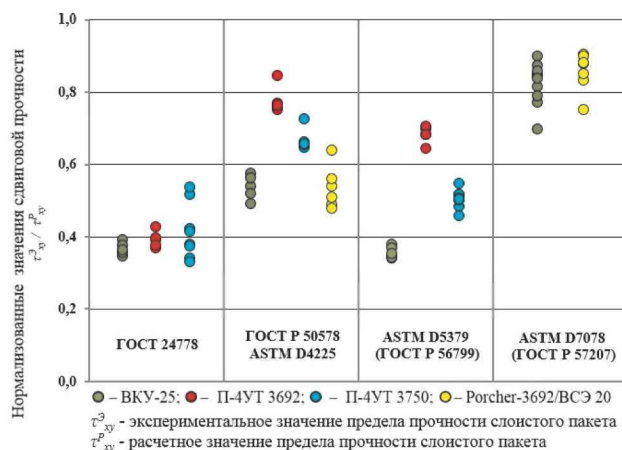


Рис. 22. Нормализованные значения сдвиговой прочности, определенные различными методами

Fig. 22. Normalized values of shear strength determined by various methods

модуля сдвига для различных партий образцов могли как превышать расчетные значения, так и быть ниже их.

Наиболее высокие значения предела прочности при сдвиге в плоскости листа были получены на образцах, испытанных по стандарту ASTM D7078 на основе метода перекашивания пластины с V-образной проточкой. Методы перекашивания пластины в шарнирном четырехзвеннике (ГОСТ 24778; ASTM D2719) и Иосипеску (ASTM D5379 и ГОСТ Р 56799) не рекомендуются для достоверного определения прочностных характеристик при сдвиге современных углепластиков, армированных слоями $\pm 45^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Tarnopolskiy Yu. M., Kintsis T. Ya. Static test methods for reinforced plastics. 3rd edition. — Moscow: Khimiya, 1981. — 272 p. [in Russian].
2. Adams D. F. A comparison of shear test methods. Composites World. 2009. <https://www.compositesworld.com/articles/a-comparison-of-shear-test-methods>
3. Adams D. F. V-notched shear testing of composites. Composites World. 2015. <https://www.compositesworld.com/articles/v-notched-shear-testing-of-composites>
4. Arnautov A., Bax T. Determination of in-plane shear characteristics of composite materials with $[\pm 45^\circ]$ layup / Mekh. Kompozit. Mater. 1996. Vol. 32. N 2. P 256 – 264 [in Russian].
5. Popov A. G., Matyushevsky N. V. Abstracts of the XX International scientific and technical conference “Structures and technologies of production from nonmetallic materials”. — Obninsk, 2013. P. 146 – 148 [in Russian].
6. Park S. Y., Choi W. J. Review of material test standardization status for the material qualification of laminated thermosetting composite structures / J. Reinforced Plast. Composites. 2020. Vol. 40. N 5 – 6. P. 235 – 258. DOI: 10.1177/0731684420958107
7. Taheri-Behrooz F., Moghaddam H. S. Nonlinear numerical analysis of the V-notched rail shear test specimen / Polymer Testing. 2018. Vol. 65. P. 44 – 53. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.11.008

8. **Alfutov N. A., Zinoviev P. A., Popov B. G.** Calculation of multilayered plates and shells. — Moscow: Mashinostroenie, 1984. — 264 p. [in Russian].
9. **Polovyi A. O., Lisachenko N. G.** Approximation of non-linear in-plane shear stress-strain diagrams of unidirectional and cross-ply reinforced polymer matrix composites / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2022. Vol. 88. N 4. P. 48 – 57 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-48-57
10. **Ilichev A. V., Gubin A. M., Akmeev A. R., Ivanov N. V.** Definition of area of the maximum shear deformations for CFRP samples on Iosipescu method, with use of optical system of measurements / *Tr. VIAM.* 2018. N 6(66). P. 99 – 109 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109
11. **Tan W., Falzon B. G.** Modelling the nonlinear behaviour and fracture process of AS4/PEKK thermoplastic composite under shear loading / *Compos. Sci. Technol.* 2016. Vol. 126. P. 60 – 77. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.02.008
12. **An Q., Merzkirch M., Forster A.** Characterizing Fiber Reinforced Polymer Composites Shear Behavior with Digital Image Correlation. — American Society for Composites. 33rd Technical Conference Proceedings. — Seattle, 2018. DOI: 10.12783/ASC33/25914
13. **Bru T., Hellstrom P., Gutkin R., et al.** Characterisation of the mechanical and fracture properties of a uni-weave carbon fibre/epoxy non-crimp fabric composite / *Data in Brief.* 2016. Vol. 6. P. 680 – 695. DOI: 10.1016/j.dib.2016.01.010
14. **Adams D. F.** The Picture Frame Shear Test method. *Composites World.* 2014. <https://www.compositesworld.com/articles/the-picture-frame-shear-test-method>
15. **Chaterjee S., Adams D., Oplinger W. D.** Test Methods for Composites: A Status Report. Vol. 3. Shear Test Methods. DOT/FAA/CT-93/17, III. Final Report. National Technical Information Service. — Springfield, VA, 1993. — 117 p.
16. **Polilov A. N.** Etudes on Composite Mechanics. — Moscow: Fizmatlit, 2015. — 320 p. [in Russian].
17. **Baere I. D., Paepegem W., Degrieck J.** Design of a modified three-rail shear test for shear fatigue of composites / *Polymer Testing.* 2008. N 27. P. 346 – 359. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.12.006
18. **Hussain A. K., Adams D. F.** Experimental Evaluation of the Wyoming-modified Two-rail Shear Test Method for Composite Materials / *Exp. Mech.* 2004. Vol. 44. N 4. P. 354 – 364. DOI: 10.1177/0014485104044317
19. **Iosipescu N.** New Accurate Procedure for Single Shear testing of Metals / *J. Mater.* 1967. Vol. 2. N 3. P. 537 – 566.
20. **Walrath D. E., Adams D. F.** The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials / *Exp. Mech.* 1983. Vol. 23. N 1. P. 105 – 110. DOI: 10.1007/BF02328688
21. **Adams D. F., Walrath D. E.** Further Development of the Iosipescu Shear Test Method / *Exp. Mech.* 1987. Vol. 27. N 2. P. 113 – 119. DOI: 10.1007/BF02319461
22. **Crossan M.** Mechanical Characterization and Shear Test Comparison for Continuous-Fiber Polymer Composites. Electronic Thesis and Dissertation Repository. — Ontario, Canada, 2018. — 118 p. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/5408>
23. **Ifju P. G.** The Shear Gage: For Reliable Shear Modulus Measurements of Composite Materials / *Exp. Mech.* 1994. Vol. 34. N 4. P. 369 – 378. DOI: 10.1007/BF02325152
24. **Conant N. R., Odom E. M.** An improved Iosipescu shear test fixture / *J. Compos. Technol. Res.* 1995. Vol. 17. N 1. P. 50 – 55. DOI: 10.1520/CTR10513J
25. **Adams D. O., Moriarty J. M., Gallegos A. M., Adams D. F.** Development and Evaluation of the V-Notched Rail Shear Test for Composite Laminates. DOT/FAA/AR-03/63. Final Report. National Technical Information Service. — Springfield, VA, 2003. — 90 p.
26. **Adams D. F.** V-Notch Rail Shear test (ASTM D 7078-05). *Composites World.* 2009. <https://www.compositesworld.com/articles/v-notch-rail-shear-test-astm-d-7078-05>
27. **Litz D. J.** Development of the Combined Loading Shear Test Method and Shear Strain Measurement in the V-Notched Rail Shear Test. MS Thesis. — Department of Mechanical Engineering. University of Utah, 2012. — 126 p.
28. **Adams D. O., Moriarty J. M., Gallegos A. M., Adams D. F.** The V-Notched Rail Shear Test / *J. Composite Mater.* 2007. Vol. 41. N 3. P. 281 – 297. DOI: 10.1177/0021998306063369
29. **Liu G., Zhang L., Guo L., et al.** A modified V-notched beam test method for interlaminar shear behavior of 3D woven composites / *Composite Struct.* 2017. Vol. 181. P. 46 – 57. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.056