

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-12-74-80>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Олег Викторович Абашев<sup>1\*</sup>, Евгений Игоревич Смагин<sup>2</sup>,  
Андрей Григорьевич Яшутин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «АэроКомпозит», Россия, 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 47, стр. 2; \*e-mail: o.abashev@gmail.com

<sup>2</sup> ПАО Корпорация «Яковлев», Россия, 125315, Москва, Ленинградский проспект, д. 68.

*Статья поступила 28 декабря 2022 г. Поступила после доработки 24 марта 2023 г.  
Принята к публикации 28 апреля 2023 г.*

Слоистые полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродного волокна и эпоксидного связующего широко применяют в конструкции пассажирских самолетов. Из ПКМ выполняют как слабонагруженные, так и основные силовые элементы планера самолетов. В производстве уровень механических характеристик для всех силовых элементов из ПКМ должен быть подтвержден экспериментальными данными — испытаниями образцов-свидетелей. Одна из важнейших характеристик слоистого композиционного материала — способность воспринимать сдвиговые нагрузки в плоскости пакетов слоев (ламинатов). Для определения характеристик сдвига используют стандартные методы испытаний — по ASTM D5379 и ASTM D7078. Эти методы позволяют установить свойства при сдвиге композиционных материалов на основе полимерной матрицы, усиленной высоко-модульным волокном. В целях выбора оптимального для выходного контроля изделия метода испытаний проведены сравнительные испытания по обоим стандартам. Приведены преимущества и недостатки рассматриваемых методов. Для испытаний были изготовлены образцы из стенки и зоны припуска лонжерона, на которых определяли значения разрушающих напряжений и модуля сдвига по каждому методу. Результаты испытаний показали, что разрушающие сдвиговые напряжения в материале, полученные по ASTM D7078, значительно (в 1,8 раза) превосходят определенные по ASTM D5379. При этом модуль упругости отличается незначительно — в 1,1 раза. Это объясняется чувствительностью результатов испытаний к методу нагружения и качеству изготовления образцов. При растяжении по ASTM D7078 нагрузка передается через лицевые поверхности образцов, имеющие высокое качество за счет оснастки или вакуумного мешка. При сжатии по ASTM D5379 критичным становится параллельность граней, через которые распределяется нагрузка. Кроме того, на результаты испытаний по ASTM D5379 оказывает влияние толщина образца — чем она больше, тем выше модуль сдвига. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по применению методов определения сдвиговых характеристик слоистых ПКМ.

**Ключевые слова:** слоистые полимерные композиционные материалы; механические характеристики ПКМ; испытание на сдвиг; методы испытаний; сопровождение производства.

## DETERMINATION OF THE SHEAR CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

© Oleg V. Abashev,<sup>1\*</sup> Evgeniy I. Smagin,<sup>2</sup> Andrey G. Yashutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC “AeroComposit”, 47/2, Leningradsky prosp., Moscow, 125167, Russia; \*e-mail: o.abashev@gmail.com

<sup>2</sup> PJSC “Yakovlev”, 68, Leningradsky prosp., Moscow, 125315, Russia

*Received December 28, 2022. Revised March 24, 2023. Accepted April 28, 2023.*

Layered polymer composite materials (LPCM) based on carbon fiber and epoxy are widely used in the construction of commercial aircraft both in manufacturing lightly loaded and main power elements of aircraft airframes. The level of mechanical characteristics for all the composite constructions must be confirmed by experimental data of coupon testing. One of the most important characteristics of a layered composite material is the ability to perceive shear loads. Standard test methods ASTM D5379 and ASTM D7078 are used to determine the shear characteristics. These test methods enable determination of the shear properties of composite materials based on a polymer matrix reinforced with a high-modulus fiber. Comparative tests were carried out according to both methods. The samples were made from the wall and the technological zones of the spar to determine the values of destructive stresses and shear modulus. The results showed that the shear stresses in the material obtained by ASTM D7078 significantly (1.8 times) ex-

ceed those determined by ASTM D5379. At the same time, the modulus of elasticity differs slightly (by 1.1 times). This is due to the sensitivity of the test results to the method of loading and the quality of the specimens. When stretched according to ASTM D7078, the load is transmitted through the front surfaces of the coupons, which are obtained with sufficiently high quality from the tooling or vacuum bag. When compressed by ASTM D5379, the parallelism of the faces through which the load is distributed becomes critical. Moreover, the thickness of the sample also affected the test results obtained according to ASTM D5379, the greater the thickness, the greater the shear modulus. Proceeding from the results obtained, the recommendations on the choice of the method to be used for determining the shear characteristics of LPCM are formulated.

**Keywords:** composite materials; mechanical characteristics; shear testing; test methods; production support.

## Введение

Последние десятилетия в силовых конструкциях пассажирских самолетов все большее применение находят композиционные материалы на основе углеродного волокна и полимерного связующего. Это не только элементы механизации (рули, закрылки, интерцепторы и воздушные тормоза), но и подкрепленные стрингерами панели фюзеляжа, шпангоуты, элементы кессона крыла [1, 2].

Широкое применение получили автоклавные и инфузионные методы формования деталей. В зависимости от конструктивных особенностей используют как автоматическую, так и ручную выкладку наполнителя или препрега.

При производстве деталей из ПКМ встает вопрос о соответствии материала деталей проект-

ным механическим свойствам [3]. Поскольку укладка детали определяется типом действующей нагрузки (например, растяжение/сжатие, кручение или их комбинация), а также ее уровнем, то необходимо определить комплекс приемочных характеристик и их значений в соответствии с характером работы детали в конструкции.

Как правило, для определения механических и физических свойств ПКМ используют стандартные методы испытаний согласно ASTM, EN, ГОСТ [4 – 10]. Поскольку современные стандарты (например, ГОСТ Р 56785–2015, ГОСТ Р 56812–2015, ГОСТ Р 57207–2016 и т.д.) разработаны на основе соответствующих ASTM путем внесения некоторых уточнений (корректировки структуры, дополнения и исключения отдельных пунктов, а также редакторских правок в целях

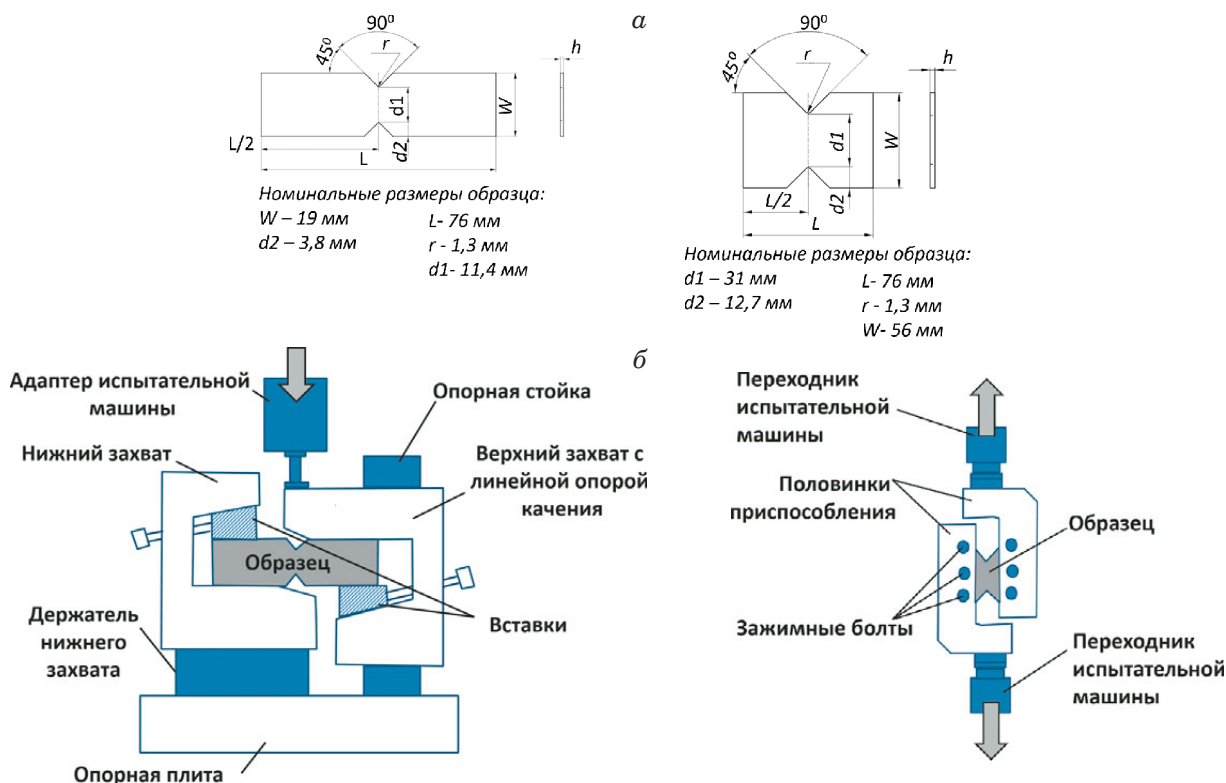


Рис. 1. Образцы (а) и схемы нагружения (б)

Fig. 1. Specimens (a) and loading scheme (b)

соблюдения норм русского языка, изменения технического стиля изложения исходя из особенностей стандартизации, характерных для Российской Федерации), то далее будем рассматривать методы ASTM.

Одной из важнейших характеристик слоистого композиционного материала является его способность воспринимать сдвиговые нагрузки.

Существует ряд методов [6, 11], позволяющих определять:

- сдвиговые нагрузки;
  - модуль сдвига;
  - максимальные сдвиговые напряжения;
  - диаграмму напряжение – деформация.
- Данные методы применяются для:

однонаправленных ламинатов с волокнами, параллельными или перпендикулярными оси нагружения испытательной машины;

ламинатов на основе тканей с направлением основы, параллельным или перпендикулярным оси нагружения испытательной машины;

композитов, армированных рубленым волокном, распределенным случайным образом.

В табл. 1 приведены методы испытаний ASTM, получившие наибольшее распространение в современной практике.

## Материалы и методы исследования

Методы испытаний D5379 [12] и D7078 [13] определяют свойства при сдвиге композиционных материалов на основе полимерной матрицы,

**Таблица 1.** Методы определения сдвиговых нагрузок

**Table 1.** Comparison of the methods for determining shear loads

| Описание и характеристики методов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Недостатки методов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ASTM D3518</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Испытание образца с укладкой $[+45^\circ/-45^\circ]_n$ на растяжение. Преимущества метода — низкая стоимость и простота реализации. В образце не возникает чистого напряжения сдвига, а по свободным краям появляются сложные поля напряжений.                                                                                                                                                                                                 | Образец не подходит для определения разрушающих напряжений (деформаций) на сдвиг из-за значительного изменения углов армирования в ходе нагружения. Диаграмма нагрузка — деформации имеет нелинейный характер. Область применения ограничивается только плоскими образцами с укладкой $[+45^\circ/-45^\circ]_n$ . Для получения данных о модуле и разрушающей деформации необходимы взаимоперпендикулярные тензодатчики. |
| <b>ASTM D4255/D4255M</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Метод испытания «перекашиванием» в системе направляющих. «Рельсовый» метод испытаний на сдвиг в плоскости.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Высокая трудоемкость испытаний и сложное изготовление образцов. Плохая повторяемость результатов из-за высокой чувствительности к качеству выполнения отверстий в образце/оснастке и допускам используемого крепежа. Наличие концентрации напряжений в образце в зонах крепежа. Необходима установка тензодатчиков для получения данных о модуле и деформации до разрушения.                                             |
| <b>ASTM D5448</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Испытание кручением образца цилиндрической формы со слоями, намотанными под углом $90^\circ$ к оси цилиндра.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Основная область применения — ПКМ, получаемый технологией намотки. Определяются только характеристики сдвига в плоскости слоев. Сложность крепления образца к оснастке.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>ASTM D5379</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Испытание изгибом образца с V-образным вырезом, установленного в специальном приспособлении. Наряду с методом D7078/D7078M демонстрирует хорошие результаты при всех направлениях вырезки образцов. В образце создается относительно равномерное состояние напряжения сдвига.                                                                                                                                                                  | Может потребоваться установка специальных накладок под оснастку. Высокая трудоемкость и сложность изготовления образца. Для получения данных о модуле и разрушающей деформации необходимы тензодатчики, установленные по двум ортогональным направлениям. Возможно незачетное разрушение образца в зонах нагружения (опор) для высокопрочных ПКМ. Требуется высокая квалификация специалистов-испытателей.               |
| <b>ASTM D7078</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Образец с V-образным вырезом устанавливается в приспособление для испытания «перекашиванием». Наряду с D5379/D5379M метод обеспечивает наилучшие результаты из стандартизированных методов. В образце создается относительно равномерное состояние напряжения сдвига. Наиболее точные измерения модуля упругости получены из испытаний ламинатов с укладкой $[0/90]_n$ . Как правило, образец не требует дополнительных накладок под оснастку. | Сложная форма образца. Для определения модуля сдвига и деформаций разрушения необходима установка тензодатчиков по двум ортогональным осям. Требуется высокая квалификация специалистов-испытателей.                                                                                                                                                                                                                     |



**Рис. 2.** Схема установки образца в оснастке по ASTM D7078 и оснастка отдельно [14]

**Fig. 2.** Assembly of Testing Fixture and Coupon ASTM D7078 [14]

усиленной высокомодульным волокном. Это наиболее распространенные методы испытаний слоистых ПКМ в настоящее время. Отличаются они формой образцов и схемой нагружения (рис. 1).

В соответствии с методом D7078 [13] образец с V-образным вырезом зажимают шестью винтами в нагружающем приспособлении (рис. 2). При растяжении двух половинок приспособления в центральной части образца создается напряженно-деформированное состояние, соответствующее чистому сдвигу в плоскости укладки. Согласно D5379 [12] образец нагружают сжатием через торцевые поверхности (рис. 3), что также приводит к чистому сдвигу в центре образца. Передача растягивающих нагрузок посредством силы трения между элементами оснастки и образцом по D7078 позволяет создать более значительные сдвиговые усилия, чем непосредственное давление на торцы образца по D5379.

**Таблица 2.** Характеристики монослоя

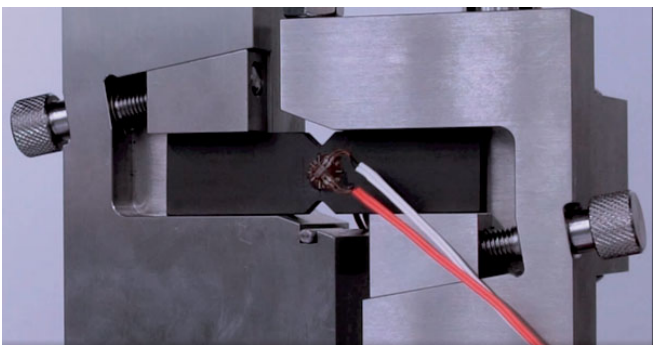
**Table 2.** Lamina properties

| Упругие свойства     |                      |                      |                      |                   |       |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------|
| $E_{+11}$ , ГПа      | $E_{+22}$ , ГПа      | $E_{-11}$ , ГПа      | $E_{-22}$ , ГПа      | $G_{12}$ , ГПа    | $\nu$ |
| 159                  | 9                    | 144                  | 9                    | 4                 | 0,3   |
| Прочностные свойства |                      |                      |                      |                   |       |
| $\sigma_{+11}$ , МПа | $\sigma_{+22}$ , МПа | $\sigma_{-11}$ , МПа | $\sigma_{-22}$ , МПа | $\tau_{12}$ , МПа | —     |
| 3200                 | 80                   | 1300                 | 230                  | 100               | —     |

**Таблица 3.** Результаты испытаний образцов из стенки лонжерона (коэффициент вариации, %)

**Table 3.** Test results (mean values, spar web)

| Выборка (толщина, мм)     | ASTM D5379   |             | ASTM D7078   |             |
|---------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                           | $\tau$ , МПа | $E$ , ГПа   | $\tau$ , МПа | $E$ , ГПа   |
| № 1 (3,85)                | 206 (1,24)   | 23,5 (9,80) | 440 (8,34)   | 26,6 (3,57) |
| № 2 (3,85)                | 206 (3,48)   | 23,9 (8,77) | 381 (5,64)   | 26,1 (4,12) |
| № 3 (7,70)                | 243 (3,50)   | 25,7 (9,71) | 347 (8,02)   | 26,4 (0,55) |
| Суммарная выборка № 1 – 3 | 218 (8,72)   | 24,4 (9,78) | 390 (12,9)   | 26,4 (2,98) |

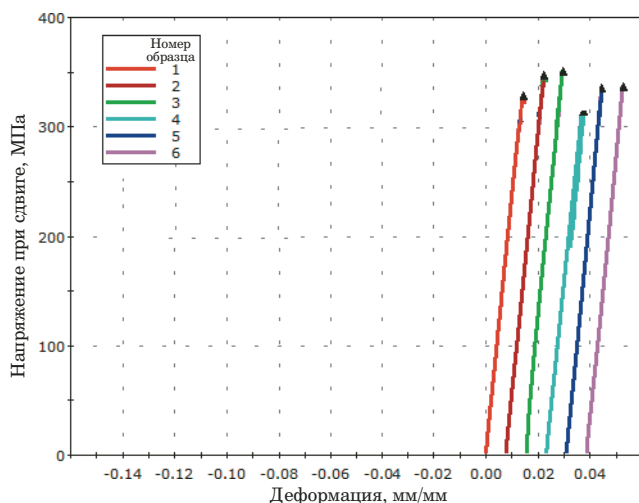


**Рис. 3.** Образец в оснастке ASTM D5379 [15]

**Fig. 3.** Coupon in assembly of testing fixture ASTM D5379 [15]

V-образный вырез в образце (по обоим методам) в центральной части позволяет увеличить сдвиговые напряжения в этой зоне по отношению к остальным участкам образца. Отметим, что ширина образца по ASTM D5379 меньше, чем по ASTM D7078, что позволяет минимизировать площадь зоны вырезки образцов.

В рамках работ по определению механических свойств перспективных композиционных материалов отечественного производства были проведены сравнительные испытания по методам ASTM D7078 и D5379. Для исследования была выбрана типовая деталь кессона крыла пассажирского самолета — лонжерон, выполненный из углепластика на основе углеродной ленты и эпоксидного связующего по технологии вакуумной инфузии. Характеристики монослоя углепластика, принимаемые в расчете, представлены в табл. 2. В лонжероне использована пакетная



**Рис. 4.** Типовая диаграмма напряжение – деформация (экспериментальные данные по ASTM D7078)

**Fig. 4.** Typical stress – strain diagram (experiment for ASTM D7078)

укладка с большим содержанием слоев с укладкой  $\pm 45^\circ$  (соотношение слоев с укладкой в направлениях  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  и  $90^\circ$  — примерно 10, 70 и 20 % соответственно). Из стенки были вырезаны образцы по ASTM D5379 и D7078 в зонах толщиной 3,9 мм (12 образцов на каждый метод) и 7,7 мм (шесть образцов на каждый метод). Из припускной зоны на поясе лонжерона вырезаны по шесть образцов для каждого метода. Невозможность вырезки образцов по ASTM D7078 из припуска объясняется относительно небольшими габаритами этой зоны детали. В местах вырезки образцов деталь плоская.

Условия испытаний всех образцов: температура  $+23^\circ\text{C}$ , кондиционирование в условиях лаборатории не менее 24 ч.

Результаты испытаний образцов, вырезанных из стенки лонжерона, представлены в табл. 3. В табл. 4 приведены данные испытаний образцов, вырезанных из зон припуска деталей

**Таблица 4.** Результаты испытаний образцов из зон припуска (коэффициент вариации, %)

**Table 4.** Test results (mean values, technological zone)

| Выборка (толщина 7,70 мм) | ASTM D5379   |             |
|---------------------------|--------------|-------------|
|                           | $\tau$ , МПа | $E$ , ГПа   |
| № 4                       | 184 (6,02)   | 22,8 (10,9) |
| № 5                       | 188 (2,54)   | 28,2 (18,2) |
| № 6                       | 195 (2,50)   | 32,6 (15,6) |
| № 7                       | 211 (3,01)   | 25,0 (3,78) |
| Суммарная выборка № 4 – 7 | 195 (6,59)   | 27,3 (19,2) |

(в том числе других лонжеронов). Все значения нормализованы по номинальной толщине [3]:

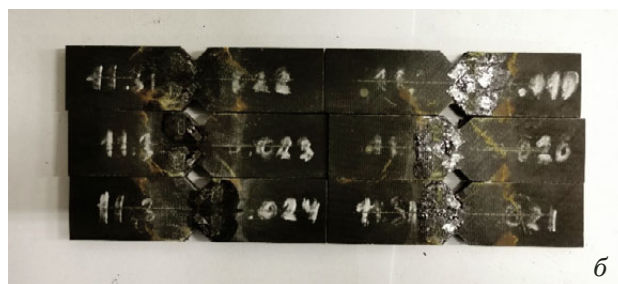
$$\text{норм. значение} = \text{эксп. значение} \frac{CPT_m}{CPT_n}, \quad (1)$$

где *норм. значение* — нормализованное значение характеристики; *эксп. значение* — значение характеристики, полученное при испытании;  $CPT_m$  — измеренная толщина образца ПКМ;  $CPT_n$  — номинальное значение толщины образца ПКМ.

Типовая диаграмма экспериментальных результатов напряжение — деформация для испытаний по ASTM D7078 представлена на рис. 4. Для наглядности начальные точки деформирования образцов смещены по оси абсцисс. Формы разрушений образцов показаны на рис. 5 и 6.

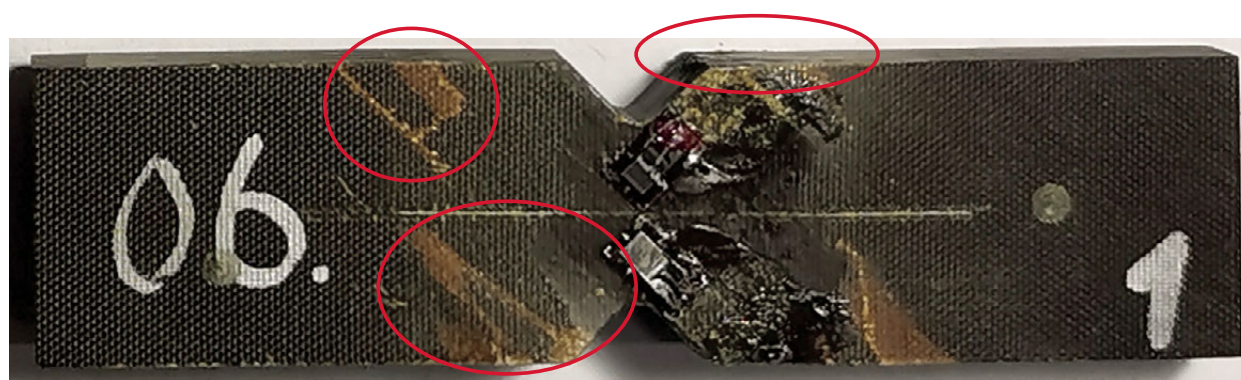
### Обсуждение результатов

Результаты испытаний показывают, что разрушающие сдвиговые напряжения в материале, полученные по ASTM D7078, значительно превосходят определенные по ASTM D5379 — 390 и 218 МПа соответственно. При этом модуль упругости отличается незначительно — 24,4 ГПа (ASTM D5379) и 26,4 ГПа (ASTM D7078). Это можно объяснить чувствительностью результа-

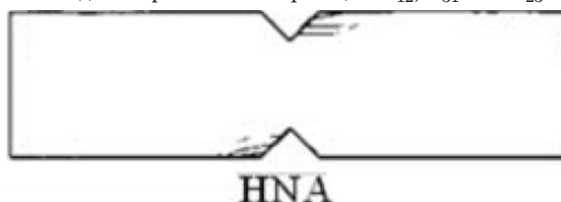


**Рис. 5.** Формы разрушения образцов при испытаниях по ASTM D5379 (а) и ASTM D7078 (б)

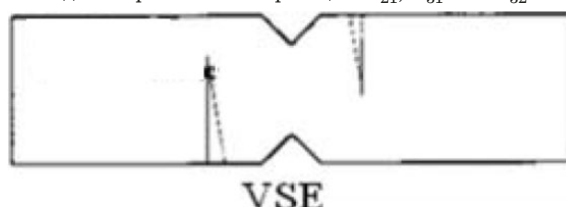
**Fig. 5.** Typical failure patterns for ASTM D5379 (a) and ASTM D7078 (b)



а

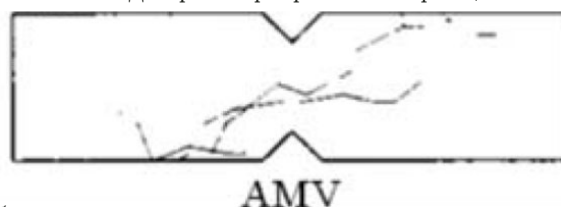
Однонаправленный образец —  $G_{12}$ ,  $G_{31}$  или  $G_{23}$ 

HNA

Однонаправленный образец —  $G_{21}$ ,  $G_{31}$  или  $G_{32}$ 

VSE

Дискретно-армированный образец



AMV

б

**Рис. 6.** Незачетные формы разрушения: а — эксперимент; б — метод ASTM D5379**Fig. 6.** Unacceptable failure modes (a) experiment, (b) ASTM D5379

тов испытаний к методу нагружения и качеству изготовления образцов. При растяжении по D7078 нагрузка передается через лицевые поверхности образцов, имеющие высокое качество за счет оснастки или вакуумного мешка. При сжатии по D5379 критичным становится параллельность граней, через которые распределяется нагрузка. Небольшие отклонения могут привести к местному подмятию торцов и преждевременному разрушению по незачетной моде, что было зафиксировано в испытаниях (см. рис. 6).

На разрушающие напряжения оказывает влияние также толщина образца. Выборки № 1 и № 2 имели номинальную толщину 3,85 мм, а выборка № 3 — 7,7 мм. Образцы по D5379 с большей площадью контакта с оснасткой имели более высокие напряжения (243 МПа), чем из выборок № 1 и № 2 (206 МПа). Толщина образца по D5379 оказала влияние и на экспериментально определенный модуль сдвига, который составил 25,7 ГПа для толстых образцов и 23,7 ГПа — для тонких.

Испытания образцов по ASTM D7078 показывают небольшие разбросы с коэффициентом вариации не более 5 % для модуля сдвига (см.

табл. 3). Для ASTM D5379 разброс значений жесткости составляет 10 и 19 % (для различных выборок). Это можно объяснить влиянием зоны приложения нагрузки на область установки тензодатчиков.

### Заключение

Проведено экспериментальное сравнение методов испытаний на сдвиг в плоскости укладки согласно ASTM D7078 и ASTM D5379. Метод, предусматривающий нагружение образца сжатием через торцевые поверхности, показывает значения напряжения и модуля сдвига ниже, чем метод нагружения растяжением и передачей нагрузки сдвигом через лицевые поверхности.

Для определения сдвиговых характеристик слоистых ПКМ при квалификации материалов и проведении выходного контроля рекомендуется использовать метод ASTM D7078 (ГОСТ Р 57207–2016).

### ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Baker A., Dutton S., Kelly D. Composite Materials for Aircraft Structures. Second Edition. — AIAA, Inc., 2004. — 569 p.

2. **Kablov E. N.** Aviation materials science: results and prospects / Vestn. RAN. 2002. Vol. 72. N 1. P. 3 – 12 [in Russian].
3. **Tomblin J. S., Ng Y. C., Raju K. S.** DOT/FAA/AR-03/19 Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems: Updated Procedure. — FAA, Office of Aviation Research. Washington D. C., 2003. — 125 p.
4. **Peters S. T.** Handbook of Composites. Second Edition. — London: Chapman & Hall, 1998. — 1118 p.
5. **Hodgkinson J. M.** Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. — Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000. — 362 p.
6. **Chatterjee S., Adams D., Oplinger D. W.** DOT/FAA/CT-93/17 Test Methods for Composites a Status Report. Vol. III. Shear Test Methods. — FAA Technical Center, 1993. — 181 p.
7. **Carlsson L., Adams D. F., Pipes R. B.** Experimental characterization of advanced composite materials. 3<sup>rd</sup> ed. — CRC Press LLC, 2003. — 350 p.
8. ASM Handbook. Vol. 21. Composites. ASM International, 2001. — 2605 p.
9. **Zureick A., Nettles A. T.** Composite Materials: Testing, Design, and Acceptance Criteria. — ASTM International, 2002. — 274 p.
10. Composite Materials Handbook (CMH-17). Vol. 1. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials. — SAE International, 2012. — 722 p.
11. ASTM D4762-11. Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials.
12. ASTM D5379. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
13. ASTM D7078. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method.
14. <http://www.sophiahightech.com/astm-d7078-testing-fixture>
15. <https://www.ssi.shimadzu.com/industry/automotive-materials-testing/composites/ASTM-D5379.html>