

УДК 620.17

DOI 10.33113/mkmk.ras.2019.25.04.473_491.02

ПРОСТЫЕ И НАДЁЖНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ СДВИГА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Жигун В.И.¹, Плуме Э.З.¹, Муйжниекс К.И.¹, Краснов Л.Л.²

¹Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия
²Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен метод экспериментального определения модулей сдвига композитов, принятый в качестве стандартов: ASTM D5379/D5379M-12 и ГОСТ Р799-2015. Отмечены его существенные недостатки. Показано, что вопрос правильного выбора метода для оценки модулей сдвига конструкционных материалов, позволяющего надёжно и с приемлемой для практики точностью устанавливать их значения, до настоящего времени ещё не решён. Для его решения исследованы некоторые другие известные методы определения модуля сдвига в плоскости пластины, а именно: метод испытания на растяжение или сжатие трёх образцов, вырезанных из ортотропного материала в направлениях главных осей его упругой симметрии и под углом 45° к ним; метод испытания на кручение квадратных пластинок, осуществляемый по трёхточечной схеме нагружения; а также метод испытания призматических образцов на четырёхточечный изгиб. На широком классе конструкционных материалов проведен детальный анализ границ их приемлемости и достоверности значений определяемой характеристики. Указаны их достоинства и недостатки. Показано, что при использовании первого из отмеченных методов возможен вариант вычисления модуля сдвига, основанный на значениях E_{45} и ν_{45} , что значительно упрощает процесс его нахождения. Предложена простая конструкция установки для осуществления второго из рассмотренных методов, позволяющая осуществлять ступенчатое нагружение и измерения прогибов. Её использование позволяет получать стабильные и воспроизводимые характеристики без использования дополнительного оборудования. Осуществлена модернизация приспособления, применяемого для осуществления третьего из рассмотренных методов. Это значительно облегчило точную установку образца и дало возможность осуществлять испытание тонких (от 1,5 мм) образцов без потери ими устойчивости в поперечном направлении. Проведено сопоставление значений модуля сдвига G_{xy} , определённых тремя различными методами на одних и тех же конструкционных материалах. Установлена достаточно хорошая их согласованность для всех рассмотренных случаев.

Ключевые слова: модуль сдвига; модуль упругости; коэффициент Пуассона; композиты; экспериментальные методы; сдвиг; сжатие; кручение квадратных пластинок; четырёхточечный изгиб

SIMPLE AND RELIABLE METHODS FOR DETERMINING THE SHEAR MODULI OF STRUCTURAL MATERIALS

Zhigun V.I.¹, Plume E.Z.¹, Muiznieks K.I.¹, Krasnov L.L.²

¹*Institute of Material Mechanics, University of Latvia, Riga, Latvia*

²*All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The method of an experimental determination of shear moduli of composites accepted as standards ASTM D5379/D5379M-12 and GOST R799-2015 has been considered. Its essential failings have been noted. It has been shown that a question of a correct selection of a method for an estimation of shear moduli of constructional materials, which can allow to determine their values reliably and with acceptable for practice accuracy is not solved until the present. Some other known methods of determination of shear modulus in the plain of the plate have been examined, in particular: a method of testing of tensile or compression of the three patterns carved from an orthotropic material in the directions to the main axis of its elastic symmetry and at an angle 45° to them; quadratic plates torsion test method carried out according to three-point loading scheme; and a method of testing of prismatic patterns on the four-point bending. The detailed analysis of borders of their acceptability and validity of values of determined characteristic has been realized using a wide range of constructional materials. Their worthiness and weaknesses have been indicated. It has been shown that during the usage of the first mentioned method, there can be a variant of determination of the shear modulus, which can be based on the values of E_{45} and ν_{45} , which greatly simplifies the process of finding it. An easy device construction for the implementing the second the mentioned method has been offered; it helps make step loading and evaluation of deflections. Its usage allows obtain stable and reproduced characteristics without exploitation of any additional equipment. The modernization of the equipment used for fulfilling the third reviewed method has been made. It considerably simplified the precise setting of a pattern and gave an opportunity to realize an examination of a slim (1,5 mm and more) patterns without losing their stability in the transverse direction. The comparison of shear modulus G_{xy} determined by three different methods on the same constructive materials has been fulfilled. Their quite good coherence in all reviewed situations has been identified.

Keywords: shear modulus; modulus of elasticity; Poisson's ratio; composites; experimental methods; shear; compression; torsion of quadratic plates; four-point bending

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиты (ПК) в настоящее время нашли широкое применение в несущих изделиях различного назначения. Расширение сферы использования этих материалов требует наличия хорошо апробированных простых и надёжных методов определения их упругих и прочностных характеристик. Некоторые из этих характеристик, как например, модули упругости ПК, не вызывают особых сложностей в их надёжном определении как теоретически, так и экспериментально. Созданные для этой цели различные стандарты не вызывают существенных критических замечаний, касающихся точности и надёжности определяемых характеристик.

Совсем иное положение имеет место по отношению к оценке сдвиговых характеристик ПК, как, например, модуля сдвига в плоскости пластины G_{xy} . Существует ряд методов его экспериментального определения [1,2]. Имеющиеся

теоретические зависимости для его расчёта [3-9] проверены экспериментально некоторыми из них на широком классе композитных материалов и показали хорошую согласованность полученных результатов [10-12]. Однако, практическое использование этих методов как-то ограничилось, в то время как метод несимметричного изгиба прямоугольных образцов с вырезами [13,14] нашёл довольно широкое применение для определения модуля сдвига G_{xy} . Несмотря на множество замечаний, указывающих на факторы, лишающие возможности получения стабильных и воспроизводимых значений определяемой характеристики и сложности его реализации [15,16], этот метод находит всё более широкое распространение. Доказательством этому является стандарт ASTM D5379/D5379M-12 и созданный на его основе ГОСТ Р56799-2015 [17,18]. Возможно, такое внимание к нему обосновано его универсальностью, позволяющей без дополнительных устройств и трудозатрат определять все три модуля сдвига. Сама такая идея весьма заманчива, но не имеет под собой никакого обоснования. Даже сами разработчики данного метода не могут указать причину нестабильного значения и большого разброса модуля сдвига G_{xy} , определяемого одновременно в нескольких лабораториях [18]. Следует также отметить, что в опубликованных работах, относящихся к оценке данного метода [19-21], не содержится информация о непосредственном его сравнении с другими методами определения модуля сдвига. Имеются лишь некоторые положительные высказывания о перспективности его использования [20,21], которые не содержат реальных подтверждений этому. В то время как в работе [22] показано, что использование данного метода неприемлемо для исследованного в ней типа композиционных материалов.

При внимательном ознакомлении с указанным стандартом возникают некоторые конкретные вопросы, которые требуют уточнения. Сущность одного из них состоит в следующем: почему приложенная к образцу сила отличается от суммы её составляющих? То есть $P \neq \frac{PL}{L-b} + \frac{Pb}{L-b}$ (рис.1). Равенство имеет место лишь при $b = 0$. При заданных параметрах образца и условиях его нагружения $b \geq 8$. Данный вопрос весьма актуален, так как от него зависит весь дальнейший расчёт определяемых характеристик. На основании сведений, имеющих в описании стандарта, трудно представить, как всё это получено. Очевиден и второй вопрос, касающийся величины перерезывающей силы Q . Для представленной схемы нагружения $Q = P \frac{L-b}{L+b}$. Для балки на двух опорах она не должна равняться приложенной силе P , а $P = Q$ имеет место для образца, закреплённого одним концом, и нагруженного силой P на свободном конце, то есть для консоли. Следовательно, приведённая в этом стандарте схема нагружения не соответствует реальной схеме, осуществляемой посредством специально разработанного устройства.

Установлено также, что при осуществлении испытаний согласно рассматриваемому стандарту, образец подвержен воздействию боковых усилий и дополнительных сил трения [19]. В данной работе также показано, что напряжённо-деформированное состояние в рабочей зоне образца, как в плоскости,

проведённой между вершинами вырезов, так и между ними, существенно неоднородно, и значительно отличается от среднего значения (отношения приложенной силы к площади поперечного сечения образца между вырезами). Поэтому для определения реального модуля сдвига вводится корректирующий коэффициент «С», который вычисляется по предложенной методике на основе конечно-элементного анализа напряжённо-деформированного состояния образца в окрестности зоны наклейки тензодатчиков. В отмеченной работе указаны и другие недостатки этого стандарта и предложено два способа их устранения: модифицированная схема испытания образца и специальная его форма с четырьмя V-образными надрезами.

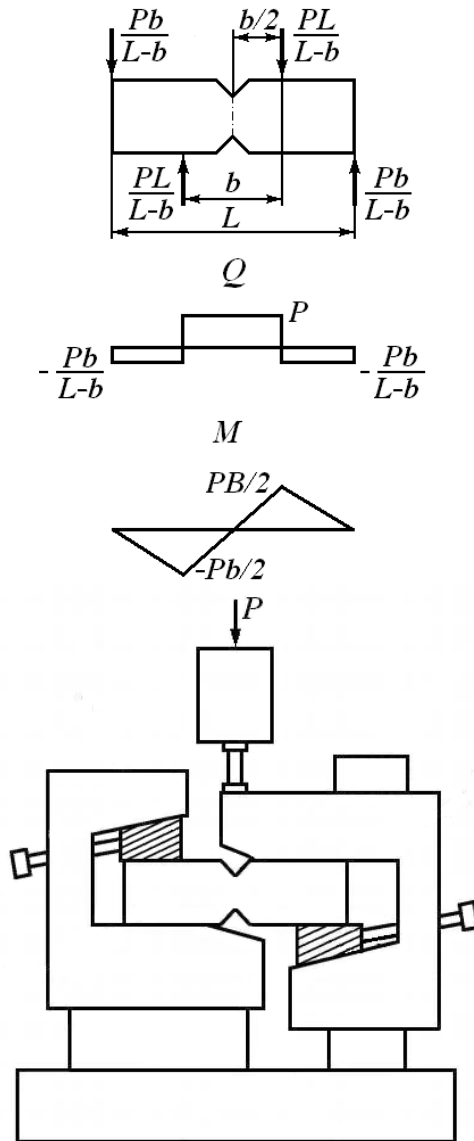


Рис.1. Схема нагружения образца, эпюры перерезывающих сил и моментов, а также схема устройства и приложения нагрузки, согласно ASTM D5379/D5379M-12.

Информация о ряде факторов, оказывающих влияние на значение характеристики, определяемой при использовании отмеченного стандарта, содержится также в работах [23,24].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что вопрос правильного выбора метода для оценки модулей сдвига конструкционных материалов, позволяющего надёжно и с приемлемой для практики точностью устанавливать их значения, до настоящего времени ещё не решён, и это является одной из актуальных задач. Для её решения необходимо провести тщательную оценку достоинств и недостатков существующих методов экспериментального определения сдвиговых характеристик, что даст возможность выявить наиболее приемлемый из них, исходя из предъявляемых требований. Решение этой задачи и составляет основную цель данной работы.

1. АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ СДВИГА КОМПОЗИТОВ

Для решения поставленной задачи из числа известных методов были выбраны три, которые не вызывают особых сложностей в реализации и лишены всяких ограничений, влияющих на стабильность и воспроизводимость результатов.

Первый из них (далее – первый метод) представляет собой испытание на растяжение или сжатие трёх образцов, вырезанных из ортотропного материала в направлениях главных осей его упругой симметрии и под углом 45° к ним. Модуль сдвига в плоскости xy вычисляется [4] как

$$G_{xy} = \left(\frac{4}{E_{45}} - \frac{1-\nu_{xy}}{E_y} - \frac{1-\nu_{yx}}{E_x} \right)^{-1}.$$

Здесь E_x , E_y и E_{45} – модули упругости в направлениях главных осей x , y и под углом 45° к ним; ν_{xy} и ν_{yx} – коэффициенты Пуассона, первый индекс снизу у которых обозначает направление изменения размеров при приложении нагрузки в направлении, отмеченном вторым индексом; ν_{xy} определяется из тождества:

$\frac{\nu_{xy}}{E_y} = \frac{\nu_{yx}}{E_x}$. Аналогичная формула

$$G_{xy} = \left(\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right)^{-1}, \quad (1)$$

более удобная для практической реализации, так как не содержит коэффициента ν_{xy} , экспериментальное определение которого достаточно затруднительно для некоторых схем армирования, приведена в работе [1]. Отмеченные модули упругости и коэффициенты Пуассона легко и достоверно определяются на простых образцах – полосках по хорошо апробированным существующим стандартам. Среди достоинств данного метода можно выделить простоту реализации и доступность в обычных условиях при наличии несложного оборудования, а также простую форму образцов. Они легко изготавливаются без заметного повреждения структуры и без появления

концентраторов напряжений, влияющих на напряжённо-деформируемое состояние образца. К недостаткам данного метода следует отнести большой расход материала, обусловленный вырезкой образцов в трёх различных направлениях, большой расход тензорезисторов и относительно высокие трудозатраты.

Второй выбранный метод – это испытание на кручение квадратных пластинок (далее – второй метод). Он является наиболее простым и хорошо апробированным. Этот метод может осуществляться двумя способами: по двух- и трёхточечной схемам нагружения [1]. Оба способа позволяют получать стабильные и воспроизводимые результаты, причём для трёхточечной схемы нагружения достоверность полученных результатов достаточно просто оценивается путём сопоставления значений G_{xy} , рассчитанных по измерению прогибов в центре и под точкой приложения нагрузки. Исходя из этого, для проведения исследований была выбрана трёхточечная схема нагружения. Привлекательность данного метода заключается в простоте его реализации как в отношении изготовления образцов, так и в отношении проведения испытаний. Ему также свойственны относительно низкие, по сравнению с другими методами, затраты на изготовление образцов, проведение испытаний и обработку результатов. К его недостаткам следует отнести необходимость для проведения испытаний наличия испытательных машин малой мощности (50...500 Н).

Третий выбранный метод – это испытание призматических образцов с двумя V-образными вырезами на несимметричный четырёхточечный изгиб (далее – третий метод) [25]. По форме используемых образцов, измеряемым деформациям и методике расчёта определяемой характеристики он аналогичен отмеченному выше стандарту. Даже схемы нагружения образцов внешними усилиями для них представлены одинаковые. Однако заметного практического использования данного метода не наблюдается, несмотря на его привлекательность с точки зрения простоты и удобства реализации (он может осуществляться так же, как проводятся обычные испытания образцов на изгиб). Основным его достоинством является возможность определения любого из трёх модулей сдвига композита. Некоторые недостатки, присущие методу, связаны: с наличием вырезов на образце, со сложностью испытания образцов небольшой толщины (1,5-3 мм) из-за потери ими поперечной устойчивости, а также из-за сложности точной установки образца на нижней траверсе. Последнее сильно влияет на разброс значений определяемой характеристики. Существенным отличием от упомянутого выше стандарта является схема нагружения образца, отражающая реальные условия испытаний.

2. МАТЕРИАЛЫ, ОБРАЗЦЫ И ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЙ

Решение поставленной задачи осуществлялось на широком классе материалов, включающем углепластики, отличающиеся между собой схемой укладки волокон, а также стеклопластики на основе ткани, другие композиционные материалы и сталь. Выбранные для исследования углепластики содержали наиболее распространённые типы армирования от укладки арматуры 1:0 до трансверсально-изотропной структуры. Изотропный материал (сталь) использовался для того, чтобы было легче проверить достоверность полученных результатов. Все исходные композиционные материалы изготавливались в виде пластин толщиной от 1,5 мм до 7,6 мм,

из которых вырезались образцы для испытания на сжатие согласно ГОСТ 25602-80 [26], пластинки с отношением стороны к толщине $l/h \geq 10$ для испытания на кручение, а также образцы призматической формы для испытания на четырёхточечный изгиб.

При использовании первого метода испытаний, на образцы-полоски наклеивались фольговые тензодатчики базой 15 мм, сопротивлением 100-400 Ом и коэффициентом тензочувствительности 2,11-2,20. Испытания проводились на сжатие на машине MTS со скоростью перемещения активного захвата 0,5 мм/мин. Образцы нагружались в пределах упругой зоны усилием, не превышающим 50% от его предельного значения. Об упругом поведении материала свидетельствовала зависимость деформаций от нагрузки на экране монитора, которая представлялась как в виде кривых, так и в цифровом варианте с частотой опроса данных 10 раз в секунду. Последний вариант представления зависимостей весьма удобен для расчёта определяемых характеристик непосредственно по цифровым данным.

Кручение квадратных пластинок осуществлялось на специально сконструированной установке, общий вид которой показан на рис.2.

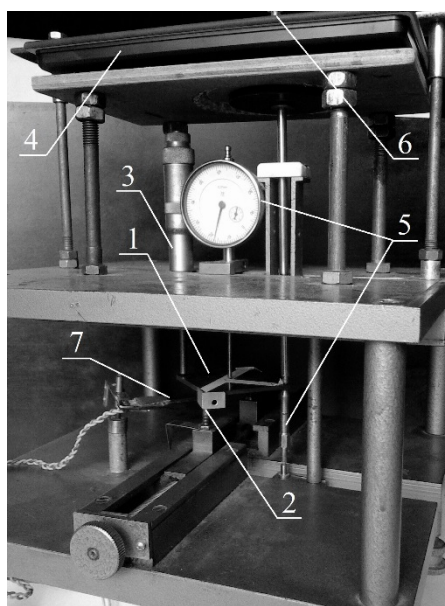


Рис.2. Установка для испытания квадратных пластинок по трёхточечной схеме нагружения: 1 – образец; 2 – опора, снабжённая ограничителем; 3 – прижимной винт; 4 – электронный нагружающий элемент; 5 – индикаторы прогибов; 6 – механизм нагружения; 7 – пластинка с наклеенными датчиками для измерения прогиба.

Установка обеспечивала: правильное расположение образца на опорах (одинаковое расстояние по углам опирания); плавное и точное приложение ступенчатой нагрузки; одновременное измерение прогибов под центром пластины и под точкой приложения нагрузки. Использование данной установки позволяет устранить основной недостаток рассматриваемого метода – необходимость наличия испытательной машины малой мощности для проведения испытаний. Следует

отметить, что как изготовление, так и эксплуатация такой установки являются значительно менее затратными с финансовой точки зрения по сравнению с любой испытательной машиной упомянутого типа. Значение модуля сдвига в плоскости главных осей упругой симметрии определялось по формулам [1]

$$G_{xy} = \frac{3Pl^2}{4h^3W_0}, \quad G_{xy} = \frac{3Pl^2}{h^3W_p},$$

где P – нагрузка, l – расстояние между центрами приложения нагрузки, равное длине стороны пластины, за вычетом диаметра опоры; W_0 и W_p – прогибы под центром и под точкой приложения нагрузки. Откуда следует, что одинаковое значение модуля сдвига имеет место, если $W_p = 4W_0$. Это условие даёт возможность оценить: во-первых, состояние поверхности при нагружении, то есть, соответствие её той начальной форме, которая описывается исходным уравнением [27], во-вторых, стабильность и надёжность полученных результатов. Информация по оценке этого факта в литературе не найдена.

Испытания третьим методом проводились на стандартном оборудовании, оснащённом двумя траверсами, на каждой из которых размещались по две подвижные опоры (рис.3).

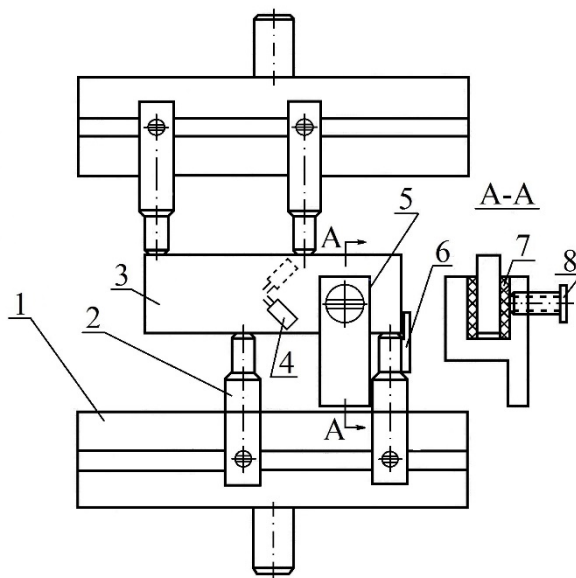


Рис.3. Схема устройства для испытания призматических образцов на четырёхточечный изгиб: 1 – траверса; 2 – опора; 3 – образец; 4 – тензодатчик; 5 – направляющий элемент; 6 – упор; 7 – прокладка; 8 – прижимной винт.

Опоры устанавливались на нижней и верхней траверсах на расстояниях 7 и 30 мм от центра и закреплялись винтами. На одной из нижних опор был установлен ограничитель и направляющие для точной установки образца, а последние – также для предохранения от потери устойчивости тонких образцов в поперечном направлении (по оси z). Исследования осуществлялись на образцах толщиной от 1,5 мм до 7,6 мм при наличии вырезов и без них. На образцы

наклеивались фольговые тензодатчики базой 6 мм и 10 мм, а также тензодатчики, изготовленные в виде решёток под углами $0^\circ \pm 45^\circ$, базой 5 мм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Некоторые вопросы, касающиеся выбранных трёх методов испытаний, не нашли достаточного отражения в публикациях, поэтому рассмотрим их более детально по каждому из методов в отдельности.

Из анализа опубликованных данных, относящихся к первому методу, видно, что его сравнение с другими методами, по-видимому, не проводилось. Поэтому решение данного вопроса в настоящей работе осуществлялось на различных типах композитов. Результаты испытания образцов, осуществлённого первым методом, представлены в табл.1, где приведены также данные для материала УПСС-10, взятые из работы [10] (6 схема).

Таблица 1.

Значения модулей сдвига конструкционных материалов и их исходные экспериментальные данные, определённые первым методом.

Хар-ка	Тип материала					
	СП на основе ткани	УП 1:0	УП 3,5:1	УПСС-1	УП СС-10	сталь
h , мм	3,2	6,2	2,3	5,7	6,7	3,7
G_{xy} , ГПа	<u>4,77</u> 4,41 – 4,98	<u>4,96</u> 4,74 – 5,22	<u>4,38</u> 4,24 – 4,50	<u>10,53</u> 10,12 – 10,83	22,57	<u>80,95</u> 76,90 – 81,41
E_x , ГПа	<u>31,02</u> 30,00 – 32,56	<u>119,42</u> 118,36–121,79	<u>96,52</u> 96,00 – 97,10	<u>149,09</u> 146,57–153,15	25,71	<u>210,00</u> 198,40–212,00
E_{45} , ГПа	<u>15,08</u> 14,58 – 16,03	<u>13,20</u> 12,53 – 13,85	<u>14,88</u> 14,68 – 15,05	<u>33,50</u> 32,14 – 34,35	53,26	–
E_y , ГПа	<u>30,53</u> 29,30 – 31,45	<u>10,29</u> 9,49 – 10,99	<u>27,00</u> 26,79 – 27,52	<u>46,79</u> 44,56 – 47,03	26,93	–
ν_{yx}	<u>0,142</u> 0,138 – 0,148	<u>0,24</u> 0,22 – 0,29	<u>0,170</u> 0,165 – 0,177	<u>0,270</u> 0,264 – 0,274	0,563	<u>0,297</u> 0,290 – 0,302
ν_{45}	<u>0,53</u> 0,50 – 0,55	<u>0,30</u> 0,33 – 0,41	<u>0,56</u> 0,50 – 0,62	<u>0,54</u> 0,52–0,56	0,215	–
G'_{xy} , ГПа	<u>4,93</u> 4,86 – 5,17	<u>5,08</u> 4,87 – 5,45	<u>4,76</u> 4,49 – 5,00	<u>10,88</u> 10,57 – 11,06	21,92	–
G'_{xy}/G_{xy}	1,03	1,02	1,09	1,03	0,97	–

Примечания:

1. Здесь и далее над чертой приведено среднее значение характеристики, под чертой – минимальное и максимальное её значения.
2. h – толщина образца.
3. Здесь и далее СП – стеклопластик; УП – углепластик; УПСС-1 – углепластик со сложной укладкой волокон; УПСС-10 – углепластик с укладкой волокон: $4/\pm 45^\circ + 1/90^\circ + 2/\pm 45^\circ + 2/0^\circ + 2/\pm 45^\circ + 1/90^\circ + 4/\pm 45^\circ$.

На каждую характеристику было испытано по 4 образца. Коэффициент вариации полученных значений не превышал 6%. Установлено, что полученные экспериментальные данные дают возможность вычислить модуль сдвига G_{xy} для композиционных материалов не только по формуле (1), но также и другим способом, используя аналогичную формулу для изотропных материалов, но через значения модуля упругости и коэффициента Пуассона. Её отличие состоит лишь в том, что значения двух последних упругих постоянных определяются для направлений, составляющих 45° с главными. То есть, для главных направлений ортотропии в плоскости xu – по формуле

$$G_{xy} = \frac{E_{45}}{2(1 + \nu_{45})}. \quad (2)$$

Значения E_{45} и ν_{45} определяются из испытаний на растяжение или сжатие образцов, вырезанных под углом 45° к главным осям упругой симметрии материала.

Для направлений, составляющих угол 45° с главными осями, G_{45} определяется через E_x и ν_{yx} .

Таким образом, для ортотропного композита имеет место аналогичная изотропным материалам связь модуля сдвига в плоскости пластины с модулем упругости и коэффициентом Пуассона, полученными под углом 45° к его главным осям упругой симметрии. Полученные двумя указанными способами значения модуля сдвига приведены в табл.1, и обозначены, соответственно, G_{xy} и G'_{xy} . Как видно из таблицы, оба варианта позволяют получать хорошо сопоставимые результаты для всех четырёх исследованных композитов. Приемлемость использования указанного способа расчёта модуля сдвига G_{xy} , исходя из значений E_{45} и ν_{45} , подтверждают и независимые данные, полученные на пространственно-армированных стеклопластиках, каркас которых образован системой двух искривлённых нитей и системой 3D [7], а также на слоистых углепластиках [10]. Для примера средние их значения представлены в табл.2 в таком виде, как они приведены в указанных работах.

Таблица 2.

Упругие постоянные пространственно-армированных композитов, взятые из работ [1,10,11], и значения модуля сдвига G'_{xy} , рассчитанные на их основе.

Характеристика	Тип материала				
	С-II-32-50	С-IV-14-49	С-III-15-48	С-I-59 (3D)	УПСС-10
E_{45} , ГПа	12,00	11,20	12,20	11,50	53,26
ν_{45}	0,38	0,54	0,48	0,51	0,215
G_{xy} , ГПа	4,05	3,75	3,87	3,90	22,00
G'_{xy} , ГПа	4,34	3,63	4,12	3,81	21,92
G'_{xy}/G_{xy}	1,07	0,97	1,06	0,98	0,10

Представленные в данной таблице материалы, названия которых начинаются на букву С – стеклопластики. Арабские цифры 32, 14 и 15, присутствующие в названиях первых трёх материалов, обозначают угол наклона волокон в образце к оси x , а последние цифры в названиях всех образцов обозначают общее объёмное содержание волокон.

Теоретическое обоснование отмеченного расчёта модуля сдвига G_{xy} можно получить, используя расчётную зависимость для определения изменения коэффициента Пуассона и модуля упругости от угла α к оси x в плоскости xy [11]

$$\frac{\nu_\alpha}{E_\alpha} = \frac{B_{xy}(1 - 2\sin^2\alpha \cos^2\alpha) - (B_{xx} + B_{yy})\sin^2\alpha \cos^2\alpha}{B_{xx}B_{yy} - B_{xy}^2} + \frac{\sin^2\alpha \cos^2\alpha}{G_{xy}}.$$

Принимая $\alpha = 45^\circ$, получим

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4\nu_{45}}{E_{45}} - \frac{2B_{xy} - B_{xx} - B_{yy}}{B_{xx}B_{yy} - B_{xy}^2}, \quad (3)$$

где

$$B_{xx} = \frac{E_x}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}}; \quad B_{yy} = \frac{E_y}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}}; \quad B_{xy} = \frac{\nu_{yx}E_y}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}}.$$

Эти упругие постоянные относятся к главным направлениям осей упругой симметрии материала. Подставляя их значения, а также значения E_{45} и ν_{45} в (3), определяем G_{xy} .

Так, например, для стеклопластика С-II-32-50 [11]: $E_x = 13,00$ ГПа; $E_y = 19,80$ ГПа; $G_{xy} = 4,05$ ГПа; $E_{45} = 12,00$ ГПа; $\nu_{xy} = 0,176$; $\nu_{yx} = 0,126$; $\nu_{45} = 0,380$. Вычисленные: по (3) $G_{xy} = 4,26$ ГПа; а по (2) $G_{xy} = 4,34$. Отношение второго значения к первому составляет 1,02, что свидетельствует о хорошем согласовании полученных данных. Следует отметить, что указанное выше значение $G_{xy} = 4,05$ ГПа [11] получено при испытании на кручение квадратных пластинок и также показывает хорошую согласованность с вычисленными значениями.

Для стеклопластика С-IV-14-49 [11]: $E_x = 20,60$ ГПа; $E_y = 20,20$ ГПа; $E_{45} = 11,20$ ГПа; $G_{xy} = 3,75$ ГПа; $\nu_{xy} = 0,166$; $\nu_{yx} = 0,138$; $\nu_{45} = 0,54$. Вычисленные: по (3) $G_{xy} = 3,60$ ГПа; по (2) $G_{xy} = 3,63$ ГПа; отношение второго значения к первому составляет 1,01.

Достоверность значений G_{xy} , полученных вторым методом была оценена на 12 типах слоистых углепластиков с различными схемами армирования [10], на других слоистых композитах [12], а также на пространственно-армированных стеклопластиках [7]. Оценка осуществлялась путём сравнения расчётных и экспериментальных значений G_{xy} . Показана их хорошая согласованность.

Вопрос, вызывающий практический интерес для данного метода – это выполнение условия $W_p = 4W_0$, которое даёт возможность установить пределы его применимости для различных классов композитов. Его оценка проводилась

на различных конструкционных материалах с различными параметрами толщины материала h и отношения длины стороны пластины l к её толщине. Данные по испытанию этих материалов собраны в табл.3. Для удобства анализа модули сдвига, рассчитанные по значениям прогибов под опорой и под центром пластины обозначены как G_{xy}^P и G_{xy}^0 , соответственно. Они свидетельствуют о том, что место измерения прогиба при нагружении пластины в рассматриваемом диапазоне измерения отмеченных параметров и прогибов не оказывает влияние на значения определяемой характеристики. Наличие небольшого превышения значений G_{xy}^P для стекло- и органопластиков обусловлено некоторым разбросом значений прогибов под опорой на некоторых ступенях приложения нагрузки. В то время как прирост прогиба под центром пластины на всех ступенях приложения равной нагрузки оставался величиной постоянной, равной $1/4$ от величины прироста прогиба под опорой.

Таблица 3.

Сопоставление значений модуля сдвига G_{xy} (ГПа), определяемых методом трёхточечного нагружения пластин на кручение, с замером прогиба в центре и под опорой.

Хар-ка	Тип материала							
	СП	СПУП	УП	УПСС	ОП	ОП	УУ-3D	сталь
$l/h; h, \text{мм}$	23; 2,8	14,3; 4,2	10; 4,4	20; 2,9	33; 1,5	10;1,5	12,2; 4,8	33;1,7
G_{xy}^P	2,69	4,86	5,43	11,06	3,50	3,49	2,11	80,03
G_{xy}^0	2,63	4,86	5,43	11,06	3,44	3,45	2,11	80,03
G_{xy}^P/G_{xy}^0	1,02	1,00	1,00	1,00	1,03	1,01	1,00	1,00

Примечание:

СПУП – стеклоуглепластик; ОП – органопластик; УУ-3D – углерод-углеродный трёхмерно-армированный композит (1:1:1).

При этом максимальный прогиб под опорой пластины из органопластика не превышал её толщины даже при максимально возможном отношении $l/h = 32$. Это даёт основание полагать, что указанный фактор в рассматриваемых пределах отношений l/h не оказывает заметного влияния на значения модуля сдвига. Проведённое исследование показывает стабильные и воспроизводимые значения определяемой характеристики, получаемые данным методом для всех испытанных материалов.

С целью оценки достоверности полученных значений G_{xy} проведено сравнение их со значениями, полученными на образцах из стали первым методом, т.е. при испытании на сжатие призматических образцов с измерением продольных и поперечных деформаций. Образцы при этом вырезались из тех же заготовок, что и пластины. Поперечное сечение образца составляло $21,1 \times 3,7$ мм,

а его вычисленные упругие характеристики: $E = 205,56$ ГПа; $\nu = 0,297$; $G = 79,24$ ГПа. Модуль сдвига при кручении пластины: $G = 80,03$ ГПа. Расхождение значений модуля сдвига, как следует из полученных данных, весьма незначительно и составляет менее 1%.

Сопоставление значений модулей сдвига, полученных этими двумя методами, для всех исследованных конструкционных материалов, приведены в табл.4. Хорошая согласованность значений, как видно из таблицы 4, даёт основание использования любого из них для оценки приемлемости третьего выбранного метода. На первом этапе проверка осуществлялась также на стальных образцах. Для этой цели были отобраны два образца, которые использовались ранее в первом методе на сжатие. На них наклеивались фольговые тензодатчики базой 5 мм, изготовленные в виде розеток под углами $0, \pm 45^\circ$. Нагружение образцов проводилось по схеме, изображённой на рис.3. Полученные значения модулей сдвига для этих образцов составляют 79,55 ГПа и 80,25 ГПа, то есть, они не имеют существенных отличий от значений, определённых первыми двумя методами (см. табл.1, табл.3).

Таблица 4.

Значения модуля сдвига G_{xy} (ГПа) конструкционных материалов, определённых различными методами.

Тип материала	Метод определения			
	Сжатие		Кручение	Несимметричный изгиб
	По формуле (1)	По формуле (2)		
СП на основе ткани	<u>4,77</u>	<u>4,93</u>	<u>4,62</u>	<u>4,88</u>
	4,41 – 4,98	4,86 – 5,17	4,52 – 4,87	4,57 – 5,10
УП 1:0	<u>4,98</u>	<u>5,08</u>	<u>5,13</u>	<u>5,36</u>
	4,84 – 5,22	4,87 – 5,41	4,90 – 5,27	4,96 – 5,56
УП 1:1	<u>4,43</u>	–	<u>4,56</u>	<u>4,39</u>
	4,21 – 4,58	–	4,31 – 4,80	4,27 – 4,53
УП 3,5:1	<u>4,38</u>	<u>4,76</u>	<u>4,52</u>	<u>4,81</u>
	4,24 – 4,50	4,49 – 5,00	4,23 – 4,62	4,70 – 4,93
УПСС	<u>11,62</u>	–	<u>10,57</u>	<u>11,48</u>
	10,90 – 11,89	–	9,97 – 11,08	11,00 – 12,30
УПСС-1	<u>10,53</u>	<u>10,88</u>	<u>10,14</u>	–
	10,12 – 10,83	10,57 – 11,06	9,91 – 10,72	–
Сталь	<u>76,95</u>	<u>76,89</u>	<u>76,89</u>	<u>77,95</u>
	75,80 – 78,95	75,68 – 79,42	75,68 – 79,42	76,90 – 79,25

Примечания:

1. На каждую точку испытано по 4 образца.
2. Коэффициент вариации для образцов из стали не превышал 2,9%, а для композитных образцов – 5,44%.

Эти же два образца были испытаны согласно ГОСТ Р56799-2015. Предварительно на первом из них было сделано два выреза требуемых размеров. Модуль сдвига второго образца (без вырезов) равен 80,05 ГПа, что соответствует значениям, полученным всеми тремя рассмотренными методами. Образец с вырезами

показал $G = 93,56$ ГПа, что заметно отличается (более чем на 16%) от уже отмеченных значений. То есть, наличие вырезов в образце заметно сказывается на определяемом значении модуля сдвига. Кроме того, согласно [23,24], испытание образцов с вырезами по принятым стандартам приводит к нестабильным результатам, зависящим от базы используемых тензодатчиков и их расположения на образце. В частности, малая база тензодатчиков (менее 5 мм) и их расположение только на одной стороне образца приводит к разбросу и нестабильности определяемых значений. Так, изменение базы датчиков с 5 мм на 3 мм влечёт изменение модуля сдвига стальных образцов на 21% (с 63,49 ГПа до 80,28 ГПа) [23]. Такое же явление изложено в работе [24], где замена базы датчиков с 6 мм на 3 мм привела к увеличению определяемой характеристики углепластиков на 20%.

Таким образом, проведённые испытания стальных образцов без вырезов всеми рассмотренными методами показывают весьма хорошие результаты по оценке надёжности и достоверности значений модуля сдвига.

Аналогичное сравнение значений модуля сдвига G_{xy} , полученных третьим методом, с данными, определёнными по указанному ГОСТу Р56799-2015 проведено на углепластиках. Испытано по два образца, изготовленных из углепластика на основе углеродной ткани (1:1) и углеродной сетки (1:0). Первый из них имел вырезы, второй вырезов не имел. На образцы наклеивались тензодатчики в виде розеток с расположением тензодатчиков под углами $0, \pm 45^\circ$. Образцы с вырезами испытывались по ГОСТу Р56799-2015, а образцы без вырезов – на четырёхточечный изгиб. Значения модуля G_{xy} для образцов с вырезами составляли 4,51 ГПа для УП 1:1 и 4,88 ГПа для УП 1:0, а их относительные продольные деформации при равных значениях нагрузки составляли, соответственно, 0,0215% и 0,0284%. Для образцов без вырезов значения модуля G_{xy} составляли 4,05 ГПа и 4,45 ГПа, соответственно для УП 1:1 и УП 1:0, а деформации – 0,0054% и 0,0060%.

Полученные данные показывают, что испытания образцов с вырезами приводят к появлению в них более значительных продольных деформаций по сравнению с образцами, не имеющими вырезов. Наличие больших продольных деформаций при испытаниях по отмеченному выше стандарту, по-видимому, является следствием ряда отмеченных выше факторов [19]. Дальнейшие исследования проводились только на образцах без вырезов с использованием фольговых тензодатчиков базой 10 мм при их наклеивке на обеих сторонах образца, – по одному тензодатчику с каждой стороны. Результаты исследования, полученные на одних и тех же материалах всеми выбранными методами, приведены в табл.4. Данные табл.4 свидетельствуют о том, что все представленные методы позволяют получать хорошо сопоставимые значения модуля сдвига G_{xy} на широком классе конструкционных материалов. Каждый из методов достаточно прост в реализации, даёт достоверные и стабильные результаты. Достоверность определяемых значений модуля сдвига подтверждают данные независимых исследований, содержащиеся в табл.2, а также опыты, проведённые на образцах из стали.

Таким образом, один из рассмотренных методов, – испытание образцов на четырёхточечный несимметричный изгиб, даёт возможность определять не только модуль сдвига в плоскости пластины, G_{xy} , но и два других модуля сдвига

композиционных материалов с высокой степенью достоверности. Для определения модуля сдвига G_{xy} в главном направлении осей упругой симметрии ортотропного материала, на наш взгляд, наиболее приемлемым, простым и удобным является метод испытания на кручение квадратных пластинок, а также растяжение или сжатие призматических образцов шириной 20-25 мм, вырезанных под углом 45° к отмеченным осям, с наклейкой на них тензодатчиков базой 15 мм в продольном и поперечном направлениях. При этом расчёт модуля сдвига удобнее производить по формуле (2).

ВЫВОДЫ

1. Достоверные и надёжные экспериментальные значения модуля сдвига в плоскости пластины G_{xy} позволяет получать любой из исследованных методов.

2. Установлено, что модуль сдвига композитов в плоскости пластины может определяться, аналогично изотропным материалам по формуле для изотропных материалов, но исходя из значений модуля упругости и коэффициента Пуассона, определённых на образцах, вырезанных под углом 45° к главным осям упругой симметрии материала. Это существенно упрощает процесс определения модуля сдвига в плоскости пластины.

3. Метод четырёхточечного изгиба призматических образцов даёт возможность получать достоверные значения всех трёх модулей сдвига ортотропных композитов.

4. Наиболее простым и удобным методом определения G_{xy} является испытание на кручение квадратных пластинок по трёхточечной схеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. *Методы статических испытаний армированных пластиков.* – М.: Химия, 1981. – 272 с.
2. *Composite materials handbook. Vol.1. Polymer matrix composites. Guidelines for characterization of structural materials.* – Department of defense. USA, 2002. – 586 p.
3. Болотин В.В. *Плоская задача теории упругости для деталей из армированных материалов // Расчёты на прочность.* – 1966. – Вып.12. – С.3-31.
4. Бидерман В.Л. *Упругость и прочность анизотропных стеклопластиков // Расчёты на прочность.* – 1965. – Вып.11. – С.3-30.
5. Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А. *Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков.* – Рига: Зинатне, 1971. – 240 с.
6. Хашин З., Розен Б.В. *Модули упругости материалов, армированных волокнами // Прикладная механика, пер. с англ.* – 1964. – №2. – С.223-232.
7. Tarnopol'skii Yu.M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Spatially Reinforced Composites.* – Lancaster, PA, USA: TPC, 1992. – 341p.
8. Hearmon R.F.S., Adams E.H. *The bending and twisting of anisotropic plates // British journal of applied physics.* – 1952. – Vol.3. – No.5. – Pp.150-156.
9. Tsai S.W., Springer G.S. *The determination of moduli of anisotropic plates // Journal of applied mechanics.* – 1963. – Pp.467-468.

10. Гуняев Г.М., Жигун И.Г., Душин М.И., Воронцов И.А., Якушин В.А., Румянцев А.Ф. *Зависимость упругих и прочностных характеристик высокомодульных композитов от схем армирования* // Механика полимеров. – 1974. – №6. – С.1019-1027.
11. Жигун И.Г., Поляков В.А. *Свойства пространственно-армированных пластиков.* – Рига: Зинатне, 1978. – 215 с.
12. Гуняев Г.М., Жигун И.Г. *Механические свойства эпоксидных боро- и углепластиков.* – М.: ОНТИ, 1973. – 101 с.
13. Adams D.F., Walrath D.E. *Iosipescu shear properties of SMC composite materials / Composite Materials: Testing and Design (6th Conference). ASTM STP 787.* – 1982. – Pp.19-33.
14. Pindera M.I., Choksi G., Hidde I.S., Herakovich C.T. *A methodology for accurate shear characterization of unidirectional composites* // Journal of Composite Materials. – 1987. – Vol.21. – Pp.1164-1185.
15. Sullivan I.L., Kao B.G., Oene H. *Shear properties and a stress analysis obtained from vinyl-ester Iosipescu specimens* // Experimental Mechanics. – 1984. – Vol.24. – No.3. – Pp.223-232.
16. Swanson S.R., Messick M., Toomber G.R. *Comparison of torsion tube and Iosipescu in-plane shear. Test results for a carbon fiber reinforced epoxy composite* // Composites. – 1985. – Vol.16. – No.3. – Pp.537-566.
17. ASTM D5379/D5379M – 12. *Standard Test Method for Shear Properties of Composites Materials by the V-Notched Beam Method.* – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
18. ГОСТ Р 56799-2015. *Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при сдвиге на образцах с V-образными надрезами.* – М.: Стандартинформ. – 2016.
19. Бычков А.А., Соловьёв А.Н., Фомин А.В., Паханьян О.Д., Шевцов С.Н. *Определение упругих характеристик полимеркомпозитных материалов на основе модифицированных методик. Теоретический и численный анализ* // Вестник ДГТУ. – 2006. – Т.6. – №2. – С.89-102.
20. Арнаутов А.К. *Перспективные методы испытаний пространственно-армированных композитов на сдвиг* // Механика композитных материалов. – 1990. – №5. – С.891-898.
21. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. *Моделирование процессов деформирования полимерных композиционных материалов на основе тканого препрега при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки* // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015 – Т.8. – №3. – С.264-272.
22. Chen Z., Wang M., Shao Y., Sun Q., Tang H., Xu H., Avery K., Zeng D., Su H. *A comparative study of two ASTM shear standards for chopped carbon fiber SMC* // SAE International Journal of Materials and Manufact. – 2018. – Vol.11. – No.4. – Pp.277-283.
23. Жигун В.И., Плуме Э.З., Краснов Л.Л., Душин М.И. *Оценка достоверности значений модулей сдвига композитов, определяемых методом ASTM D5379/D5379M – 12 (ГОСТ Р 56799 – 2015)* / Материалы XIV международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – М.: РАН, 2019. – Т.1. – С.3-12.

24. Ильичёв А.В., Губин А.М., Акмеев А.Р., Иванов Н.В. *Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений* // Труды ВИАМ. – 2018. – №6. – С.99-109.
25. Iosipescu N. *New accurate procedure for single shear testing of metals* // Journal of materials. – 1967. – Vol.2. – No.3. – Pp.537-566.
26. ГОСТ 25602-80. *Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.* – М.: Госстандарт СССР. – 1980.
27. Tsai S.W. *Experimental determination of the elastic behavior of orthotropic plates* // ASME. – 1965. – Ser. B. – Vol.87. – No.3. – Pp.315-318.

REFERENCES

1. Tarnopol'skii Yu.M., Kincis T.Ya. *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Methods of static testing of reinforced plastics]*. Moskva, Khimiya, 1981, 272 p.
2. *Composite materials handbook. Vol.1. Polymer matrix composites. Guidelines for characterization of structural materials.* Department of defense. USA, 2002, 586 p.
3. Bolotin V.V. *Ploskaya zadacha teorii uprugosti dlya detalej iz armirovannykh materialov [The plane problem of elasticity theory for details of reinforced materials]*. *Raschyoty na prochnost'*, 1966, Iss.12, Pp.3-31.
4. Biderman V.L. *Uprugost' i prochnost' anizotropnykh stekloplastikov [Elasticity and strength of anisotropic GFRP]*. *Raschyoty na prochnost'*, 1965, Iss.11, Pp.3-30.
5. Skudra A.M., Bulavs F.Y., Rocens K.A. *Polzuchest' i staticheskaya ustalost' armirovannykh plastikov [Creep and static fatigue of reinforced plastics]*. Riga, Zinatne, 1971, 240 p.
6. Hashin Z., Rosen B.W. *The elastic moduli of fiber-reinforced materials.* Journal of Applied Mechanics, 1964, Vol.31, Pp.223-232.
7. Tarnopol'skii Yu. M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Spatially Reinforced Composites.* Lancaster, PA, USA, TPC, 1992, 341p.
8. Hearmon R.F.S., Adams E.H. *The bending and twisting of anisotropic plates.* British journal of applied physics, 1952, Vol.3, No.5, Pp.150-156.
9. Tsai S.W., Springer G.S. *The determination of moduli of anisotropic plates.* Journal of applied mechanics, 1963, Vol.30, No.3, Pp.467-468.
10. Gunyaev G.M., Zhigun I.G., Dushin M.I., Voroncov I.A., Yakushin V.A., Rumyantsev A.F. *Zavisimost' uprugikh i prochnostnykh kharakteristik vysokomodul'nykh kompozitov ot skhem armirovaniya [Dependence of elastic and strength characteristics of high modulus composites on schemes of reinforcement]*. *Mekhanika polimerov*, 1974, No.6, Pp.1019-1027.
11. Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Properties of spatially reinforced plastics.* Riga, Zinatne, 1978, 215p.
12. Gunyaev G.M., Zhigun I.G. *Mekhanicheskie svojstva ehpoksidnykh boro- i ugleplastikov [Mechanical properties of epoxy boron and carbon fiber reinforced plastics]*. Moskva, ONTI, 1973, 101 p.

13. Adams D.F., Walrath D.E. *Iosipescu shear properties of SMC composite materials*. Composite Materials: Testing and Design (6th Conference). ASTM STP 787, 1982, Pp.19-33.
14. Pindera M.I., Choksi G., Hidde I.S., Herakovich C.T. *A methodology for accurate shear characterization of unidirectional composites*. Journal of Composite Materials, 1987, Vol.21, Pp.1164-1185.
15. Sullivan I.L., Kao B.G., Oene H. *Shear properties and a stress analysis obtained from vinyl-ester Iosipescu specimens*. Experimental Mechanics, 1984, Vol.24, No.3, Pp.223-232.
16. Swanson S.R., Messick M., Toomber G.R. *Comparison of torsion tube and Iosipescu in-plane shear. Test results for a carbon fiber reinforced epoxy composite*. Composites, 1985, Vol.16, No.3, Pp.537-566.
17. ASTM D5379/D5379M – 12. *Standard Test Method for Shear Properties of Composites Materials by the V-Notched Beam Method*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
18. GOST R 56799-2015. *Kompozity polimernye. Metod opredeleniia mekhanicheskikh kharakteristik pri sdvige na obrazcah s V-obraznymi nadrezami [Polymer composites. Method for determination of mechanical characteristics at shear on V-notched samples]*. Moskva, Standartinform, 2016.
19. Bychkov A., Soloviev A., Fomin A., Pahanyan O., Shebtsov S. *Opredelenie uprugikh kharakteristik polimerkompozitnykh materialov na osnove modifitsirovannykh metodik. Teoreticheskij i chislennyj analiz [Polymeric composite elastic constants determination on the basis of modified technique. Theoretical & numerical analysis]*. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006, Vol.6, No.2, Pp.89-102.
20. Arnautov A.K. *Perspektivnye metody ispytaniy prostranstvenno-armirovannykh kompozitov na sdvig [Promising methods for the shear testing of spatially reinforced composites]*. Mekhanika kompozitnykh materialov, 1990, Vol.26, No.5, Pp.891-898.
21. Laptev M. Yu., Adamov A.A. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove tkanogo preprega pri ispytaniyakh na izgib i mezhsloevoj sdvig metodom korotkoj balki [Modelling of deformation behavior of polymer of polymeric woven fabric prepreg-based composite materials in flexure and short beam interlaminar shear testing]*. Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred, 2015, Vol.8, No.3, Pp.264-272.
22. Chen Z., Wang M., Shao Y., Sun Q., Tang H., Xu H., Avery K., Zeng D., Su H. *A comparative study of two ASTM shear standards for chopped carbon fiber SMC*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2018, Vol.11, No.4, Pp.277-283.
23. Zhigun V.I., Plume E.Z., Krasnov L.L., Dushin M.I. *Otsenka dostovernosti znachenij modulej sdviga kompozitov, opredelyaemykh metodom ASTM D5379/D5379M – 12 (GOST R 56799 – 2015) [Estimation of reliability of values of shear modules of composites determined by ASTM D5379/ASTM D5379M – 12 method (GOST R 56799 – 2015)]*. Materialy XIV mezhdunarodnogo simpoziuma “Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki”, Moskva, RAN, 2019, Vol.1, Pp.3-12.
24. Ilichev A.V., Gubin A.M., Akmeev A.R., Ivanov N.V. *Opredelenie oblasti maksimal'nykh sdvigovykh deformatsij dlya obraztsov ugleplastika po metodu Iosipesku, s ispol'zovaniem opticheskoy sistemy izmerenij [Definition of area of the*

- maximum shear deformations for CFRP samples on Iosipescu method, with use of optical system of measurements]. Trudy VIAM, 2018, No.6, Pp.99-109.*
25. Iosipescu N. *New accurate procedure for single shear testing of metals.* Journal of Composite Materials, 1967, Vol.2, Pp.537-566.
 26. GOST 25602-80. *Raschyoty i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy kompozitsionnykh materialov s polimernoj matritsej (kompozitov). Metod ispytaniya na szhatie pri normal'noj, povyshennoj i ponizhennoj temperaturakh [Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials. Test for compression properties at normal, elevated and low temperature].* Moskva, Gosstandart SSSR, 1980.
 27. Tsai S.W. *Experimental determination of the elastic behavior of orthotropic plates* ASME, 1965, Ser.B, Vol.87, No.3, Pp.315-318.

Поступила в редакцию 4 ноября 2019 года.

Сведения об авторах:

Жигун Валерий Иванович – д.т.н., н.с., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия; e-mail: goracij.goracij@yahoo.com

Плуме Эгил Зигурдович – д.и.н., дир., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия; e-mail: egils@pmi.lv

Муйжниекс Карлис Индрикович – науч.асс., Латвийский университет, Институт механики материалов, г. Рига, Латвия

Краснов Лаврентьев Лаврентьевич – к.т.н., доц., нач. сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, Россия