

УДК 006.065.2:006.011

*Хейн Зин Мое¹, Йе Тинт Хту¹, В. А. Киреев^{1,2}*¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского

Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов

Представлен анализ существующих методов испытаний полимерных композитов. Механические воздействия представляют собой статические и ударные нагрузки. Для оценки работоспособности конструкции в этих условиях необходимо знать физико-механические характеристики материала. Дано сравнение отечественных и зарубежных стандартов, а также нестандартных методов определения характеристик упругости (модулей) композитов при испытаниях на изгиб.

Ключевые слова: полимерные композиты, статические нагрузки, физико-механические (модули упругости) характеристики, стандарты на испытания.

*Hein Zin Moe¹, Ye Tint Htoo¹, V. A. Kireev^{1,2}*¹Moscow Institute of Physics and Technology (State University)²Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute

Comparison of methods of determination of elastic and strength characteristics in polymer composite materials

The paper presents the analysis of existing methods for testing polymer composites. Mechanical impacts are static and shock loads. In order to evaluate the performance of the structure in these conditions, it is necessary to know the physical and mechanical characteristics of the material. Comparison of domestic and foreign standards, as well as nonstandard methods for determining the characteristics of elasticity (modulus) of composites during bending is given.

Key words: polymer composites, static loads, physical and mechanical (modulus of elasticity) characteristics, test standards.

1. Введение

Испытания на изгиб являются одним из эффективных способов экспериментального определения модулей упругости и сдвига. Важной задачей при внедрении композиционных материалов в авиакосмических конструкциях является разработка методов определения физико-механических характеристик материалов.

Анализ результатов на изгиб не так прост и нагляден как, например, при растяжении. Измеряемые при испытаниях величины — нагрузки и прогиб — с исследуемыми характеристиками материала — прочность, упругие постоянные — связаны с аналитическими зависимостями, точность которых определяется лежащими в их основе гипотезами.

Испытательные машины, в том числе и настольного типа, должны комплектоваться приспособлениями, позволяющими испытывать образцы на изгиб.

© Хейн Зин Мое, Йе Тинт Хту, Киреев В. А., 2018

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2018

Механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются часто основными, поскольку практически при всех применениях ПКМ в самых различных областях конечные изделия в той или иной степени подвергаются силовым нагрузкам. Отсюда следуют основные причины, которые приводят к необходимости проведения испытаний:

- подтверждение выполнения основных требований к надежности;
- осуществление контроля качества;
- контроль технологического процесса;
- проведение сравнения материалов между собой и т. д. [11, 17].

Несмотря на развитие методов стандартизации испытаний как в Российской Федерации, так и за рубежом, специалист все еще испытывает трудности в понимании и интерпретации результатов испытаний. Это обусловлено довольно сложной процедурой проведения испытаний, количеством предлагаемых методов и организаций, занимающихся стандартизацией (ГОСТ, ISO, ASTM).

Для того чтобы преодолеть эти трудности, необходимо понимать, что на самом деле измеряется при использовании той или иной методики, а также смысл получаемых результатов с точки зрения применения материала [6–12].

Один из критериев метода испытаний — теоретическая способность выполненного испытания привести к желаемому результату, такому, как однородное линейное напряжённое состояние в ходе всего испытания. Однако вышеупомянутые факторы имеют тенденцию увеличивать чувствительность композиционных материалов к более широкой гамме испытательных параметров, чем это отмечено в случае с обычными материалами.

Поэтому метод испытаний, или относительная невосприимчивость к незначительным изменениям опытного образца и процедуры испытаний, столь же важны, как и теоретическое совершенство метода.

Таким образом, применение метода испытания по ASTM может изменять геометрию образцов, условия испытания и размеры испытательной оснастки (по сравнению с методом ГОСТа), что в свою очередь может привести к различиям в определяемых значениях, не из-за изменения свойств материала, а из-за изменения метода испытаний.

Рассмотрим подробнее рекомендуемые ГОСТами и ASTM методики наиболее актуальных и применяемых на практике испытаний (изгиб).

2. Испытания на изгиб

Испытания ПКМ при изгибе наиболее дешевы и доступны, но возникающее при изгибе напряженно-деформированное состояние (НДС) является неоднородным, регистрируемые показатели интегрально содержат информацию о растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге.

Механические показатели ПКМ, определяемые при изгибе на этапе разработки материала:

- разрушающее напряжение при поперечном изгибе;
- модуль упругости при поперечном изгибе.

Достаточно приемлемым стандартом при этом виде испытаний является ГОСТ 25.604-82 [9]. Он распространяется на ПКМ, армированные непрерывными высокомодульными углеродными, борными, органическими и другими волокнами, структура которых симметрична относительно их срединной плоскости.

Испытания этих материалов на изгиб проводятся при нормальной (20 °С), повышенной (до +180 °С) и пониженной (до –60 °С) температурах.

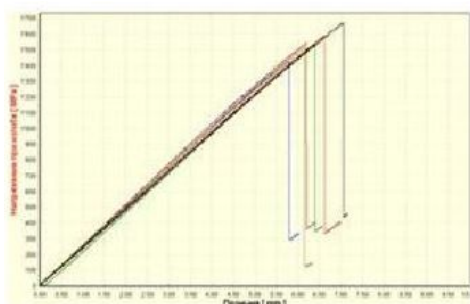
Метод испытания на изгиб стеклопластиков установлен ранее в ГОСТе 4648-71 [10]. Зарубежными технически неидентичными аналогами [8] являются ASTM D 7264/D7264M-07 [2] и ASTM D 790 [1].

Проведены испытания углепластика 2 на изгиб по методике, указанной в ГОСТе 25.604-82. Образец, установленный в испытательной оснастке, и диаграммы деформирования при изгибе представлены на рис. 1.

Регламентируемая ГОСТом 25.604-80 процедура обработки результатов испытаний при изгибе также содержит ошибку в определении модуля упругости при поперечном изгибе, модуля упругости при чистом изгибе и предела прочности при поперечном изгибе – использование указанных в стандарте размерностей приращения нагрузки, расстояния между опорами, ширины и высоты образца, приращения прогиба дает величины модулей и предела прочности с размерностью [МПа] в 106 раз меньше истинного значения.



а)



б)

Рис. 1. Образец из углепластика 2 на изгиб в испытательной оснастке(а), диаграммы изгиба образцов углепластика 2 в направлении оси армирования (б)

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний образцов на изгиб по ГОСТу

Материал	Характеристики	Обозначение	Среднее значение	СКО	Коэффициент вариации
Углепластик 2	Предел прочности при изгибе	σ_e^n , МПа	1546,02	81,88	5,30
Модуль упругости при поперечном изгибе	E_n^n , ГПа	115,32	3,07	2,66	

Для устранения этой ошибки достаточно задавать приращения нагрузки с размерностью [Н] либо все величины с размерностью [мм] подставлять в формулу с размерностью [м].

Кроме этой ошибки первой версии стандарта в его последней редакции [8] также найдено 3 ошибки набора формул приложения 4, добавленных при переходе к электронной версии стандарта.

Испытание на изгиб измеряет силу, необходимую для сгибания луча в трехточечных условиях нагрузки. Данные часто используются для выбора материалов для деталей, которые будут поддерживать нагрузки без сгибания. Модуль упругости при изгибе используется в качестве индикатора жесткости материала при изгибе. Поскольку физические свойства многих материалов (особенно термопластов) могут варьироваться в зависимости от температуры окружающей среды, иногда бывает целесообразно тестировать материалы при температурах, которые имитируют предполагаемую среду конечного использования.

Чаще всего образец лежит на опоре, и нагрузка наносится на центр с помощью носы загрузки, создающего трехточечный изгиб с определенной скоростью. Параметры для этого теста — диапазон поддержки, скорость загрузки и максимальное отклонение для теста. Эти параметры основаны на толщине образца и по-разному определяются ASTM и ISO. Для ASTM D790 тест останавливается, когда образец достигает 5% отклонения или образец ломается до 5%. Для ISO 178 испытание прекращается, когда образец ломается. Если он не ломается, испытание продолжается как можно дольше, и сообщается напряжение в 3,5% (обычное отклонение).

На универсальной испытательной машине установлена термокамера. Камера спроектирована таким образом, чтобы испытательные опоры от основания и подзаголовок универсального тестера проходили через верх и низ камеры. Стандартные испытательные приборы устанавливаются внутри камеры, и испытания проводятся внутри контролируемой тепловой среды так же, как и при температуре окружающей среды. Камера имеет внутренние электронагреватели для повышенных температур и использует внешний углекислый газ в качестве хладагента для снижения температуры.

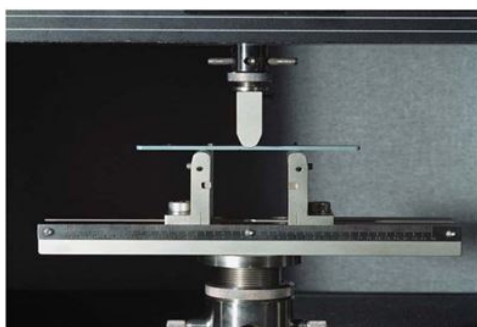


Рис. 2. Испытания на изгиб

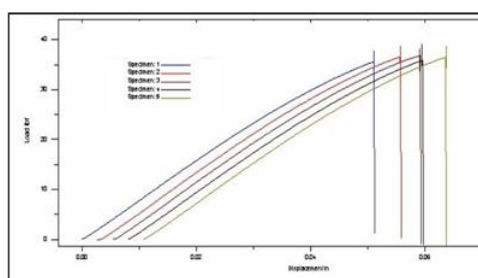


Рис. 3. Результатом гибкого теста является график зависимости нагрузки от смещения или напряжения от напряжения. Из этих данных можно вычислить ряд свойств, таких как модуль упругости при изгибе и предел текучести

Размер выборки. Для этого теста можно использовать различные формы образцов, но наиболее часто используемый размер образца для ASTM составляет $3,2 \times 12,7 \times 125$ мм ($0,125 \times 0,5 \times 5,0$ дюймов), а для ISO – $10 \times 4 \times 80$ мм.

Данные. Изгибное напряжение при производительности, изгибная деформация при культуре, изгибное напряжение при разрыве, изгибная деформация при разрыве, изгибное

напряжение при 3,5% (ISO) или отклонение 5,0% (ASTM), модуль упругости при изгибе. Кривые напряжения / деформации и необработанные данные могут быть предоставлены.

3. Механические испытания

Прочность и модуль упругости при изгибе (ГОСТ 4648-71, ISO 178, DIN 53452, ASTM D790). Прочность на изгиб является мерой, показывающей, насколько хорошо материал сопротивляется изгибу, или «какова жесткость материала». В отличие от нагрузки при растяжении при испытаниях на изгиб все силы действуют в одном направлении. Обыкновенный свободно опертый стержень нагружается в середине пролета, тем самым создается трехточечное нагружение. Для вычисления модуля упругости при изгибе по зарегистрированным данным строится кривая зависимости прогиба от нагрузки. Начиная от исходной линейной части кривой, используют минимум пять значений нагрузки и прогиба. Модуль упругости при изгибе (отношение напряжения к деформации) наиболее часто упоминают при ссылке на упругие свойства. Модуль упругости при изгибе эквивалентен наклону линии, касательной к кривой напряжения/деформации, в той части этой кривой, где пластик еще не деформировался. Значения напряжений и модуля упругости при изгибе измеряются в МПа.

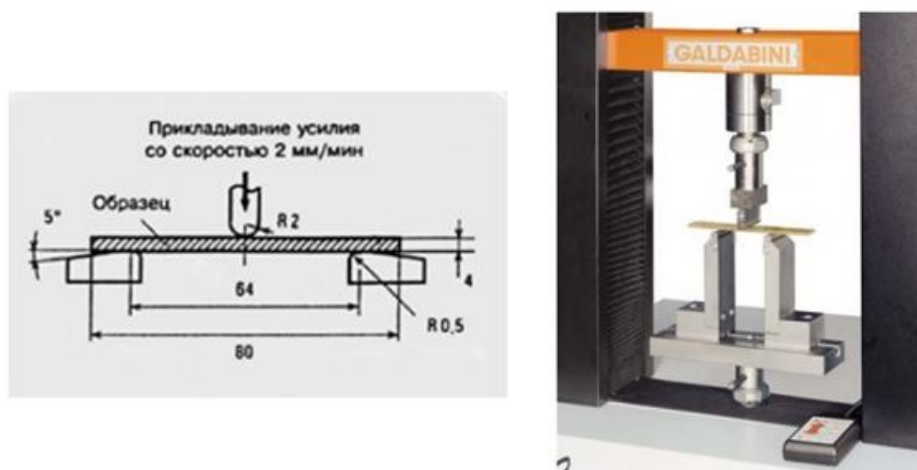


Рис. 4. Испытания на изгиб и устройство для испытаний на изгиб

Разрушающее напряжение при изгибе, для полимерных материалов, обычно превышает разрушающее напряжение при растяжении и это отображено в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Разрушающее напряжение при изгибе, для полимерных материалов

Материал	Разрушающее напряжение, МПа, при		
	растяжении	изгибе	сжатии
Полистирол	95	60	70
Винипласт	55	100	80
Фторопласт-4	22,5	11–14	20
полистирол блочный	35–40	100	80
полиамид	50–60	70	70–90
поликарбонат	57–60	80–100	80–90
стеклотекстолит	340	700	358

4. Определение характеристик упругости и прочности композитов при испытании на изгиб

Классическая программа определения характеристик упругости на цилиндрических оболочках из ортотропных КМ предусматривает следующие виды нагружения при нормальной, повышенной и пониженной температурах:

- а) осевое растяжение при определении ε_1^+ и ν_{12}^+ ;
- б) осевое сжатие при определении ε_1^- и ν_{12}^- ;
- в) внутреннее давление при определении ε_2^+ и ν_{21}^+ ;
- г) внешнее давление при определении ε_2^- и ν_{21}^- ;
- д) кручение при определении G_{12} ,

здесь E – модуль упругости при растяжении,
 ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига,

знаки $[+]$ и $[-]$ соответствуют растяжению и сжатию, а индексы 1 и 2 – осевому и окружному направлениям.

Для выполнения этой программы необходимо пять стендов, реализующих указанные виды нагружения.

Важной задачей при внедрении композиционных материалов в авиакосмических конструкциях являются разработки методов определения физико-механических характеристик материалов. Испытания на изгиб являются одним из эффективных способов экспериментального определения модулей упругости и сдвига.

Проводят испытания прямоугольных образцов (полос) на изгиб по трехточечной и четырехточечной схемам (рис. 5, 6).

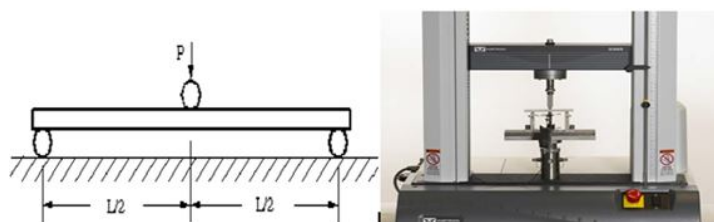


Рис. 5. Трехточечный изгиб:

1 – образец; P – нагрузка; L – длина пролета

Например, секущий модуль упругости крайних волокон E_f^{second} , МПа, вычисляют по формуле

$$E_f^{second} = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot h^2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости при изгибе, [МПа], L – диапазон поддержки, [мм], m – наклон секущей кривой графика (нагрузка–деформация), b – ширина, h – высота.

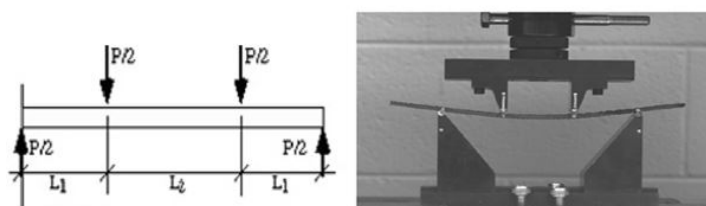


Рис. 6. Четырехточечный изгиб:

1 – образец; P – нагрузка; L – длина пролета

Секущий модуль упругости крайних волокон, E_f^{second} , МПа, по схеме рис. 2 вычисляются по формуле

$$E_f^{second} = \frac{0,17 \cdot L^3 \cdot m}{b \cdot h^3}. \quad (2)$$

Рассмотрим другой способ определения. Для этого воспользуемся установкой (рис. 7), которая позволяет один образец испытывать по схеме трехточечного изгиба, а другой – по схеме четырехточечного. Она содержит основание 1, установленные на нем опоры 2, 3 и симметрично расположенные по отношению к ним промежуточные опоры 4 и 5, предназначенные для размещения на них образцов 6, 7 и элемент 8, предназначенный для нагружения образца 6 поперечной силой в сечении, равноудаленном от опор.

Испытания проводят следующим образом. Дополнительный образец 7 в виде прямолинейного стержня с постоянной по длине жесткостью располагают на основе опор 2 и 3. На дополнительном образце 7 через промежуточные опоры 4 и 5, установленные на нем между основными опорами 2, 3 и симметрично им, располагают образец 6, который выполнен аналогично образцу 7. В среднем сечении между опорами образец 6 нагружают через элемент 8 силой P . Производят измерения прогибов f_1 и f_2 образцов 6 и 7. В этом случае образец 6 испытывается по схеме трехточечного изгиба (расстояние между опорами $2l$), а образец 7 – по схеме четырехточечного изгиба.

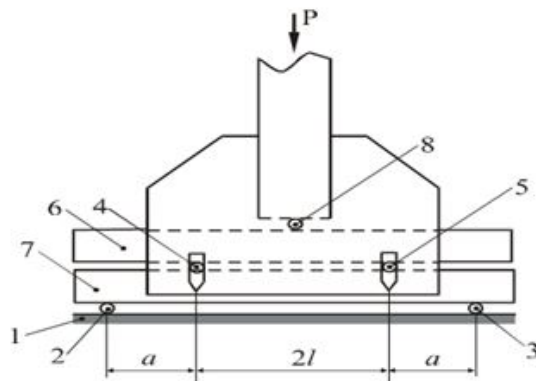


Рис. 7. Установка для испытаний образцов на изгиб 1 – основание; 2, 3 – основание опоры; 4, 5 – промежуточные опоры; 6, 7 – образцы; 8 – элемент для нагружения образца 6, P – нагрузка; L – длина пролета

Модули упругости и сдвига определяют по формулам

$$E_x = \frac{P \cdot a^3}{6I} \eta \frac{1 + 3\eta - \eta^2}{f_2 - f_1}, \quad (3)$$

$$G_{xz} = \frac{kPa}{2F} \eta \frac{1 + 3\eta - \eta^2}{f_1(1 + 3\eta) - f_2\eta^3}. \quad (4)$$

При определении модуля сдвига можно исключить погрешность, связанную с прогибом образца, вызванным изгибающими моментами.

Изменение расстояния между образцами 6 и 7 в их средних сечениях будет

$$\Delta = f_1 - f_2 = f_{1Q} - f_{2Q} + f_{1M} - f_{2M}. \quad (5)$$

Потребуем, чтобы $f_{1M} = f_{2M}$, т.е. $\frac{1}{E_x I} \frac{PL^3}{6} = \frac{1}{E_x I} \frac{Pa^3}{6} + \frac{1}{E_x I} \frac{Pa^2 L}{2}$.

Тогда имеем относительно $\eta = l/a$ кубическое уравнение:

$$\eta^3 - 3\eta - 1 = 0. \quad (6)$$

Значение $\eta^* = 1.86$ является корнем уравнения (6). Тогда из уравнения (5) найдем

$$G_{xz} = \frac{0.232kPl}{F(f_1 - f_2)}. \quad (7)$$

Таким образом, выбрав расстояние между основной и промежуточной опорами равным $a = 0.532l$, удастся исключить влияние изгибающих моментов на величину изменения Δ расстояния между образцами в их средних сечениях, а модуль сдвига определять по формуле (7).

Отметим, что если выбрать $a = l$, то $f_{1Q} = f_{2Q}$.
 $f_1 - f_2 = f_{1M} - f_{2M} = \frac{Pl^3}{6E_x I} - \frac{Pl^3}{6E_x I} - \frac{Pl^3}{2E_x I} = -\frac{Pl^3}{2E_x I}$, что дает

$$E_{xz} = \frac{Pl^3}{2I(f_2 - f_1)}, \quad (8)$$

то есть можно исключить влияние перерезывающих сил на величину изменения Δ в их средних сечениях, а модуль упругости определять по формуле (8).

5. Заключение и выводы

1. Дан сравнительный анализ методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов.
2. Приведен анализ экспериментальных методов для определения характеристик упругости КМ, которые в сочетании с известными методами позволяют реализовать программу определения комплекса характеристик упругости КМ, необходимого для расчетов конструкций по технической теории, и могут быть использованы при разработке и совершенствовании стандартов. Анализ проведен с точки зрения эффективности их применения, учитывая экономические показатели.
3. Эффективность применения предложенного метода [10] сводится к следующему: одновременное определение характеристик при одном нагружении и измерение максимальных значений деформаций снижают погрешности испытаний, сокращают время проведения испытаний, и количество испытательных установок уменьшают стоимость проведения сертификационных испытаний.
4. Требуется разработка стандартов на предложенный метод [10].

Литература

1. ASTM D790-07 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 11 p.
2. ASTM D7264/D7264M-07 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 11 p.
3. *Baker A.A. [et al.]*. An affordable methodology for replacing metallic aircraft panels with advanced composites // *Compos Part A Appl. Sci. Manuf.* 2002. 33(5).
4. *EMTA's Evaluation of the Elastic Properties for Fiber Polymer Composites Potentially Used in Hydropower Systems*, Ba Nghiep Nguyen and Joshua Paquette, August 2010.
5. *Bruhwiller E., Keller T., Hugli E., Wang Y., Zhao X.-L.* Material and Structural Performance of Fiber-Reinforced Polymer Composites at Elevated and High Temperatures. 2009. URL: https://infoscience.epfl.ch/record/131180/files/EPFL_TH4340.pdf
6. *Адамов А.А., Лантев М.Ю., Горижкова Е.Г.* Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2012. № 3. С. 72.

7. *Васильев В.Б., Протасов В.Д., Болотин В.В. [и др.]* Композиционные материалы. Справочник. М: Машиностроение, 1990.
8. ГОСТ 25.604-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М., 6 с.
9. ГОСТ 4648-71 Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. М.: Изд-во стандартов, 1992. 11 с.
10. *Киреев В.А., Наумов С.М.* Способ определения модулей упругости и сдвига анизотропных материалов при испытаниях на изгиб // Труды ЦАГИ. 2002. Вып. 2651. С. 199–202.
11. *Курносков А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И.* Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. N 8. С. 08. URL: <http://www.viam-work.ru> (дата обращения: 01.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
12. *Калгин А.В., Кудрин А.М., Солопченко А.В., Яолокова М.Ю.* Определение предела прочности на растяжение новых отвержденных безрастворных связующих на эпоксидной основе в соответствии со стандартом ASTM D 638 // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 11.1. С. 47–49.
13. Методы испытаний полимерных материалов, ООО «КОМЕФ» 2007.
14. *Мельников Д.А., Ильичев А.В., Вавилова М.И.* Сравнение стандартов для проведение механических испытаний стеклопластиков на сжатие. DOI: 18577/2307-6046-2017-0-3-6-6, 2017.
15. *Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. М: Химия, 1981.
16. *Феодосьев В.И.* Спротивление материалов М.: из-во МГГУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 37. 157 с.
17. *Шах В.* Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 732 с.

References

1. ASTM D790-07 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 11 p.
2. ASTM D7264/D7264M-07 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 11 p.
3. *Baker A.A. [et al.]*. An affordable methodology for replacing metallic aircraft panels with advanced composites. Compos Part A Appl. Sci. Manuf. 2002. 33(5).
4. EMTA's Evaluation of the Elastic Properties for Fiber Polymer Composites Potentially Used in Hydropower Systems, Ba Nghiep Nguyen and Joshua Paquette, August 2010.
5. *Bruhwiller E., Keller T., Hugli E., Wang Y., Zhao X.-L.* Material and Structural Performance of Fiber-Reinforced Polymer Composites at Elevated and High Temperatures. 2009. URL: https://infoscience.epfl.ch/record/131180/files/EPFL_TH4340.pdf
6. *Adamov A.A., Laptev M.Yu., Gorshkova E.G.* Analysis of domestic and foreign regulatory framework for mechanical testing of polymer composite materials. Constructions from composite materials. 2012. N 3. С. 72.
7. *Vasiliev V.B., Protasov V.D., Bolotin V.V.* Composite materials. Directory. М.: Mechanical Engineering, 1990.

8. GOST 25.604-82 Calculations and tests for strength. Methods of mechanical testing of composite materials with a polymer matrix (composites). Bending test method at normal, high and low temperatures. Moscow: 6 с.
9. GOST 4648-71 Plastics. Method for testing for static bending. Moscow: Publishing Standards, 1992. 11 p.
10. *Kireev V.A., Naumov S.M.* A method for determining the moduli of elasticity and cobbling of anisotropic materials in bending tests. Proceedings of TsAGI. 2002. I. 2651. P. 199–202.
11. *Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I.* Fiberglass plastic constructional purpose for aircraft construction. Proceedings VIAM: electron. scientific and technical. journal. 2015. N 8. P. 08. URL: [http:// www.viam-work.ru](http://www.viam-work.ru) (reference date: 01.12.2016). DOI: 10.18577 / 2307-6046-2015-0-8-8-8.
12. *Kalgin A.V., Kudrin A.M., Solopchenko A.V., Yayolokova M.Yu.* Determination of the tensile strength of new cured solvent-free binders on an epoxy basis in accordance with the ASTM D 638 standard. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Technicala university in 2011. V. 7. N 11.1. P. 447–49.
13. Test methods for polymer materials. LLC KOMEF. 2007.
14. *Melnikov D.A., Ilichiv A.V., Vavilov M.I.* Comparison of standards for carrying out mechanical tests of GRP for compression. DOI: 18577 / 2307-6046-2017-0-3-6-6, 2017.
15. *Tarnopolsky Yu.M., Kincis T.Ya.* Methods of static testing of reinforced plastics. M.: Chemistry, 1981.
16. *Feodosyev V.I.*, Resistance of materials, publishing house MGU State University. Bauman, 1999. 37. 157 p.
17. *Shah V.* Reference guide for testing plastics and analyzing the causes of their dilution. SPb: Scientific foundations and technologies, 2009. 732 p.

Поступила в редакцию 02.03.2018