

УДК 006:620.1

Д.А. Мельников¹, А.В. Ильичев¹, М.И. Вавилова¹

СРАВНЕНИЕ СТАНДАРТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА СЖАТИЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6

Рассмотрены стандарты (ГОСТ 25.602, ГОСТ 4651 – ISO 604, ASTM D 6641 – ГОСТ Р 56812) для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие. Для определения достоверности полученных значений по рассматриваемым стандартам изготовлены три типа образцов из стеклопластиков на основе различных стеклянных наполнителей (равнопрочная, кордная стеклоткани и стеклянный ровинг). Данные образцы испытаны в соответствии со стандартами на испытание. Результаты проведенных испытаний показали, что получаемые значения предела прочности при сжатии различаются в зависимости от стандарта, и чем выше прочность и жесткость материала, тем больше расходятся значения. Установлено, что испытания на сжатие стеклопластиков, армированных кордными тканями и однонаправленными ровингами, по стандарту ГОСТ 4651 приводят к получению заниженных результатов и высокому разбросу данных. Наиболее оптимальным отечественным стандартом для испытания слоистых стеклопластиков является ГОСТ Р 56812. Он позволяет получить достоверные значения предела прочности с наименьшим коэффициентом вариации.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: *стеклопластик, сжатие, композиционный материал, механические испытания на сжатие.*

In this work standards (GOST 25.602, state standard specification 4651 ISO 604, ASTM D 6641 – GOST R 56812) for carrying out mechanical tests of GRP on compression are considered. For determination of reliability of the received values on considered standards three types of samples have been made of GRP on the basis of different glass fillers (durable fiber glass fabric and cord fiber glass fabrics and glass roving). These samples have been tested according to standards for testing. Results of the carried-out tests have shown that received values of durability at compression differ depending on standard and then high strength and rigidity of material, subjects disperse values more. It has been established that compression tests of GRP by cord glass fabrics and unidirectional roving to GOST 4651 leads to receiving the underestimated results and high variability of data. The most optimum domestic standard for testing of layered GRP is GOST P 56812. He allows receiving reliable values of durability with the smallest factor of variation.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»)[1].

Keywords: *fiberglass, compression, composite material, mechanical tests on compression.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время одним из основных показателей промышленного прогресса является происходящая во всем мире замена традиционных изделий из металла на изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Полимерные композиционные материалы состоят из двух основных компонентов: непрерывной фазы – матрицы (связующего) и армирующего наполнителя. Основные прочностные характеристики композита, такие как предел прочности, модуль упругости при растяжении и другие, во многом определяются свойствами армирующего наполнителя. В качестве армирующих наполнителей широкое применение нашли стеклянные волокна. Высокая механическая прочность, хорошие электро- и теплоизоляционные свойства, стойкость к воздействию агрессивных сред в различных климатических условиях, возможность конструирования изделий с учетом действующих нагрузок путем выбора рациональной структуры армирования, разнообразие и простота технологических методов изготовления изделий, доступность и относительно низкая стоимость стеклянных наполнителей – все это позволило широко применять стеклопластики для деталей и агрегатов летательных аппаратов, создавать изделия с необходимыми летно-техническими характеристиками [2–5].

Механические свойства 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. [6, 7].

Несмотря на развитие методов стандартизации испытаний как в Российской Федерации, так и за рубежом, средний 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 [8–11].

Среди разнообразных методов анализа прочностных свойств ПКМ статические одноосные механические испытания на сжатие являются наиболее информативными для практических рекомендаций использования ПКМ в определенных видах конструкций [12].

Основная трудность испытаний на сжатие состоит в создании однородного напряженного состояния по всей высоте рабочей части образца и точном установлении вида разрушения. С ростом степени анизотропии, т. е. при переходе к высокомодульным материалам, эти трудности увеличиваются. Разрушение образца под действием нагрузки, приложенной по его торцам, может произойти от сжатия и от потери устойчивости. Образцы при испытаниях на сжатие могут разрушаться также от смятия или скалывания опорных поверхностей. Причем потеря устойчивости может произойти в результате местной или общей потери устойчивости армирующих волокон вследствие слабого сопротивления материала сдвигу (особенно при нагружении перпендикулярно направлению армирования) и вследствие выпучивания слоев армирующего наполнителя, лежащих у наружных боковых поверхностей образца. Это надо иметь в виду при оценке прочности при сжатии как отношения разрушающей нагрузки к площади поперечного сечения в месте разрушения. Указанные особенности разрушения ПКМ при

сжатии должны быть учтены при выборе размеров образца, предназначенного как для определения прочности, так и для определения упругих постоянных [13].

Данная работа посвящена сравнению прочностных свойств ПКМ на основе стеклянных наполнителей – стеклопластиков при сжатии в соответствии с известными государственными стандартами РФ (ГОСТ) и стандартами ASTM американского общества по испытаниям и материалам (American Society for Testing and Materials).

Анализ отечественных и зарубежных стандартов необходим для определения их сравнительных преимуществ и недостатков, а также для сертификации деталей авиационной техники на базе признанных мировых стандартов [9].

Для определения прочностных свойств стеклопластиков при сжатии могут быть использованы следующие стандарты:

– ГОСТ 4651–2014, пригодный для испытаний пластмасс, включая наполненные и армированные композиции, листы из жестких и полужестких термореактивных и термопластичных материалов [14, 15]. Данный ГОСТ актуализирован в 2014 г. и гармонизирован относительно международного стандарта ISO 604:2002. ГОСТ 4651–2014 основан на принципе торцевой передачи напряжения сжатия на образец. При нагружении по торцам образца сжимающая нагрузка прилагается через плоские параллельные опорные поверхности, неровность которых не должна превышать 0,025 мм. Точность приложения нагрузки и установки образца в этих приспособлениях обеспечивается высокой точностью изготовления направляющих и опорных поверхностей. Альтернативным методом испытаний является стандарт ASTM D695, в нем приложение нагрузки на образец осуществляется также по торцевой зоне. Благодаря использованию регламентированного приспособления в стандарте ASTM D695 обеспечивается сохранение устойчивости образца относительно оси нагружения, с условием соблюдения допуска по модулю упругости материала образца (не более 41 ГПа);

– ASTM D6641-14 предназначен для испытания ПКМ, армированных непрерывными волокнами или дискретно армированных рубленными волокнами [16]. Стандарт предусматривает использование прямолинейных образцов, нагруженных комбинацией сдвигового и торцевого нагружения. Оснастка состоит из двух пар стальных блоков, смещающихся относительно друг друга по направляющим с линейными подшипниками качения. Путем регулировки затяжки болтов можно контролировать соотношение торцевой и поперечной нагрузки (нагрузки на сдвиг) на образец. Однако при использовании этой оснастки для измерения продольной деформации нужны специальные малогабаритные контактные экстензометры или тензодатчики. На основе данного стандарта разработан отечественный гармонизированный ГОСТ Р 56812, который действует с 01.01.2017 [17];

– ГОСТ 25.602–80, пригодный для испытаний ПКМ на основе непрерывных высокомолекулярных углеродных, борных, органических и других волокон, структура которых симметрична относительно их срединной плоскости. Данный ГОСТ устанавливает метод испытания этих материалов на сжатие при комнатной (20°C), повышенной (до 180°C) и пониженной (-60°C) температурах [18]. Усилие сжатия передается образцу посредством приложения комбинации сдвиговой и торцевой нагрузок, аналогично схеме нагружения в соответствии с ASTM D6641-14.

Представляет практический интерес сравнение результатов, полученных в ходе проведения испытаний на сжатие образцов стеклопластиков, полученных по различным стандартам. Стандарт ASTM D695 в данной статье не рассматривается.

Материалы и методы

Проведено сравнение стандартов РФ и США, действующих в области испытаний на сжатие, – ГОСТ 4651–2014, ГОСТ 25.602–80, ASTM D6641-14. В табл. 1

сопоставлены основные расхождения рассмотренных стандартов испытаний. Описанные параметры являются наиболее критичными при проведении испытаний и последующем расчете полученных результатов.

Таблица 1

Основные расхождения стандартов ГОСТ и ASTM на сжатие

Наименование	ГОСТ 4651–2014 (гармонизированный с ISO 604)	ASTM D6641-14	ГОСТ 25.602–80
Требования к погрешности приборов измерения геометрических размеров образцов	$\pm 0,01$ мм	$\pm 0,0025$ мм (для толщины и ширины); $\pm 0,025$ мм (для длины)	$\pm 0,05$ мм (толщиной – до 10 мм); $\pm 0,1$ мм (толщиной – свыше 10 мм)
Накладки на образцы (длина)	Не предусмотрены	63,5 мм	≥ 35 мм
Допустимое отклонение температуры при кондиционировании и хранении образцов (при стандартных условиях: температура 23°C, влажность 50;)	Температура $\pm 2^\circ\text{C}$; влажность $\pm 10\%$	Температура $\pm 3^\circ\text{C}$; влажность $\pm 10\%$	Температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$; влажность $\pm 5\%$
Способ приложения нагрузки	Торцевое нагружение	Комбинация сдвиговой и торцевой нагрузок	
Скорость проведения испытаний	От 1 до 20 мм/мин	1,3 мм/мин	1 мм/мин
Классификация разрушения	Код разрушения не определяется (не допускается разрушение в захватах)	Согласно классификатору по типовым видам разрушения устанавливается код	Код разрушения не определяется (не допускается разрушение в захватах)
Статистическая обработка	Среднее арифметическое; стандартное отклонение; коэффициент вариации		

Однако одним из важных элементов любого стандарта на проведение механических испытаний является указание геометрических размеров образца с регламентируемыми допусками (табл. 2). Как правило, размеры образца связаны со специфической геометрической формой приспособления, а также с выполнением условий исключения «паразитных» напряжений в образце. Рекомендации по выбору ширины (b) и длины (l) образца в зависимости от стандарта несколько расходятся.

Таблица 2

Геометрические параметры образцов ПКМ при испытании на сжатие

Параметр	ГОСТ 4651–2014 (гармонизированный с ISO 604)	ASTM D6641-14	ГОСТ 25.602–80
Длина (l)	50,0 \pm 2 мм (для определения модуля упругости); 10,0 \pm 0,2 мм (для определения прочности)	140,0 \pm 0,3 мм	Рабочая зона (4,5 h)+зажимная зона
Ширина (b)	10,0 \pm 0,2 мм	12,0 мм	Однонаправленный наполнитель, схема $[0^\circ]_n$: 10,0 \pm 0,5 мм; другие наполнители и схемы: 15,0 \pm 0,5 мм
Толщина (h)	4 мм ($\pm 0,2\%$)	2 мм	>1 мм (рекомендуемая 2 мм)
Размер рабочей зоны образца (с условием сохранения устойчивости)	Не регламентирована	13 мм	4,5 h
Требования к накладкам: – длина (l_n) – толщина (h_n)	Не предусмотрены	Рекомендуется для однонаправленных наполнителей, схема $[0^\circ]_n$: 63,5 мм 1,5 мм	>35 мм 1 \div 3 мм

В качестве объектов исследования выбраны стеклопластики ВПС-53/120 (на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-34 и равнопрочной стеклоткани типа 120) и ВПС-61/Т-25 (на основе эпоксидного связующего ВСЭ-39 и кордной стеклоткани Т-25(ВМП)-78), а также ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200 (на основе ровинга). Свойства тканых стеклянных наполнителей представлены в табл. 3. Стеклопластики на основе тканых материалов и эпоксидных смол применяются при изготовлении ответственных деталей и конструкций авиационной техники благодаря своим высоким физико-механическим свойствам, коррозионной стойкости, антимагнитным свойствам, удовлетворительным радиотехническим характеристикам. Такие материалы применяют при производстве зализов, створок люков, элементов механизации крыла, хвостового оперения в самолетах и в конструкциях лопастей вертолетов [19, 20].

Таблица 3

Свойства стеклянных наполнителей

Наполнитель (нормативная документация)	Содержание волокна в направлении основы, %	Структура нити		Номинальное количество нитей на 1 см		Поверх- ностная плотность, г/м ²
		по основе	по утку	по основе	по утку	
Стеклоткань типа 120 (ТУ ВУ 300059047.010)	50,7	ЕС5 11×2 Z 100	ЕС5 11×2 Z 100	23,6	22,9	105
Стеклоткань Т-25(ВМП)-78 (ГОСТ 19170)	93,0	ВМПС10 844	ВМПС10 42	10	6	365

Результаты

Для сравнения результатов, полученных по трем методикам (ГОСТ 4651–2014, ASTM D6641-14, ГОСТ 25.602–80), проведены механические испытания на сжатие образцов стеклопластиков ВПС-53/120 (на основе равнопрочной стеклянной ткани), ВПС-61/Т-25 (на основе кордной стеклянной ткани) и ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200 (на основе стеклянного ровинга).

Для проведения механических испытаний элементарных образцов на сжатие – по отработанному технологическому режиму – изготовлены плиты стеклопластиков. Все плиты выложены из препрегов с укладкой армирующего наполнителя по схеме $[0^\circ]_n$. Для снижения ошибки эксперимента все образцы для испытаний изготавливали из одной и той же плиты соответствующей толщины, полученной за одну технологическую операцию из одной партии связующего и наполнителя. Согласно стандартам испытаний ГОСТ 4651–2014, ASTM D6641-14, ГОСТ 25.602–80 и в соответствии с рекомендациями и регламентируемыми размерами, указанными в них, изготовлены образцы стеклопластиков для проведения испытаний. Образцы представляют собой пластины прямоугольной формы с геометрическими размерами, представленными в табл. 4.

Таблица 4

Геометрические размеры образцов

Параметр	Значения параметров для стеклопластиков							
	ВПС-53/120			ВПС-61/Т-25			ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200	
	по ГОСТ 4651	по ASTM D6641	по ГОСТ 25.602	по ГОСТ 4651	по ASTM D6641	по ГОСТ 25.602	по ГОСТ 4651	по ASTM D6641
Длина (<i>l</i>), мм	10	140	130	10	140	130	10	140
Ширина (<i>b</i>), мм	10	12	15	10	12	10	10	12
Толщина (<i>h</i>), мм	4	2	2	4	2	2	4	4

Механические испытания на сжатие образцов стеклопластиков ВПС-61/Т-25, ВПС-53/120 и ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200 проводили в стандартной атмосфере

(температура 23°C, φ=50%) с использованием аттестованной электромеханической испытательной машины LFM-100 с максимальной рабочей нагрузкой 100 кН (класс точности 0,5 – от 200 Н до 100 кН по ISO 7500-1). На рис. 1–3 представлены образцы стеклопластиков до и после испытаний.

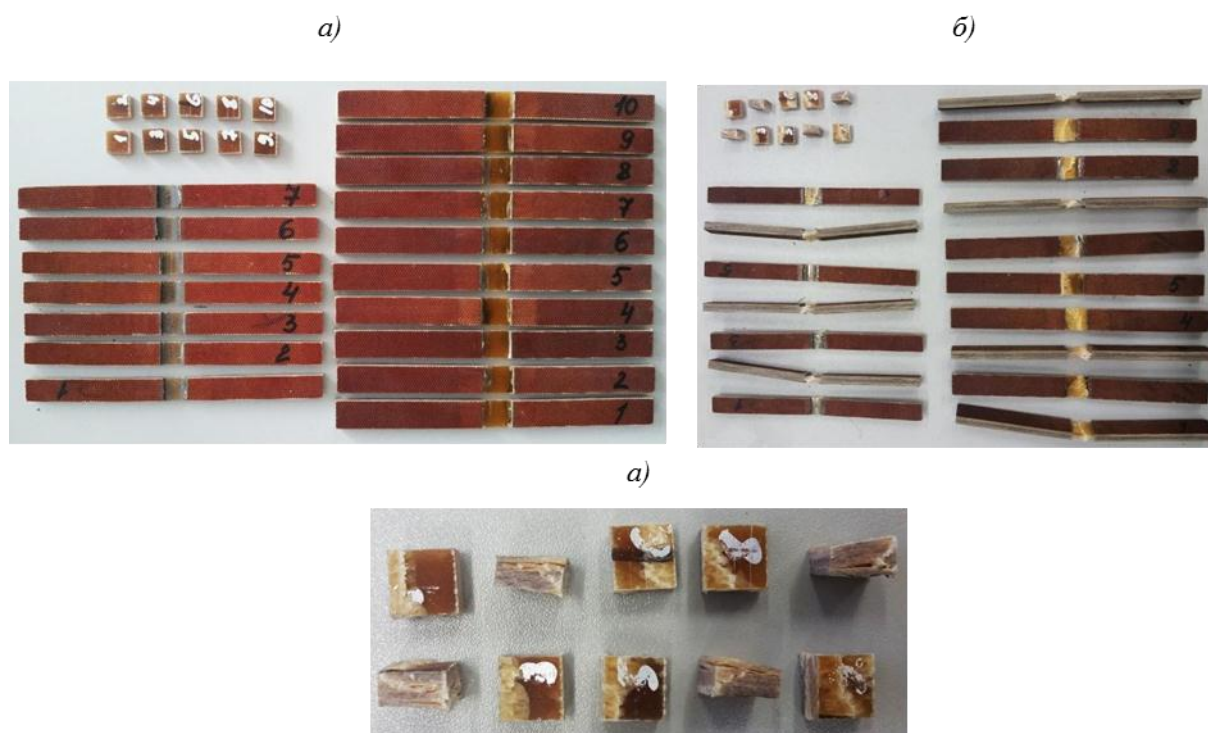


Рис. 1. Образцы стеклопластика ВПС-61/Т-25 до (а) и после испытаний (б, в)

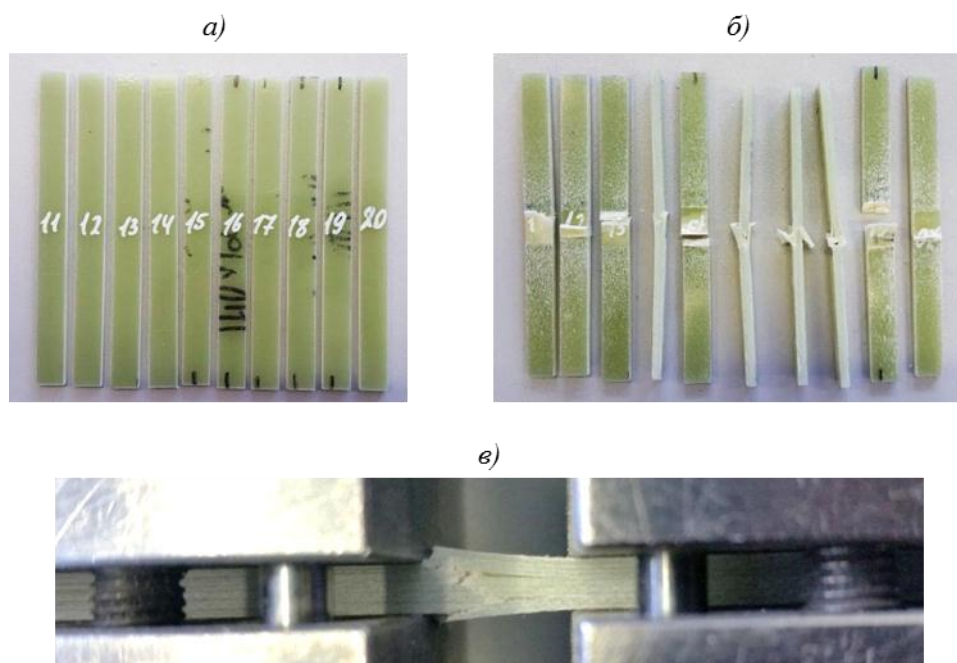


Рис. 2. Образцы стеклопластика ВПС-53/120 до (а) и после испытаний (б), а также разрушенный образец в оснастке (в)

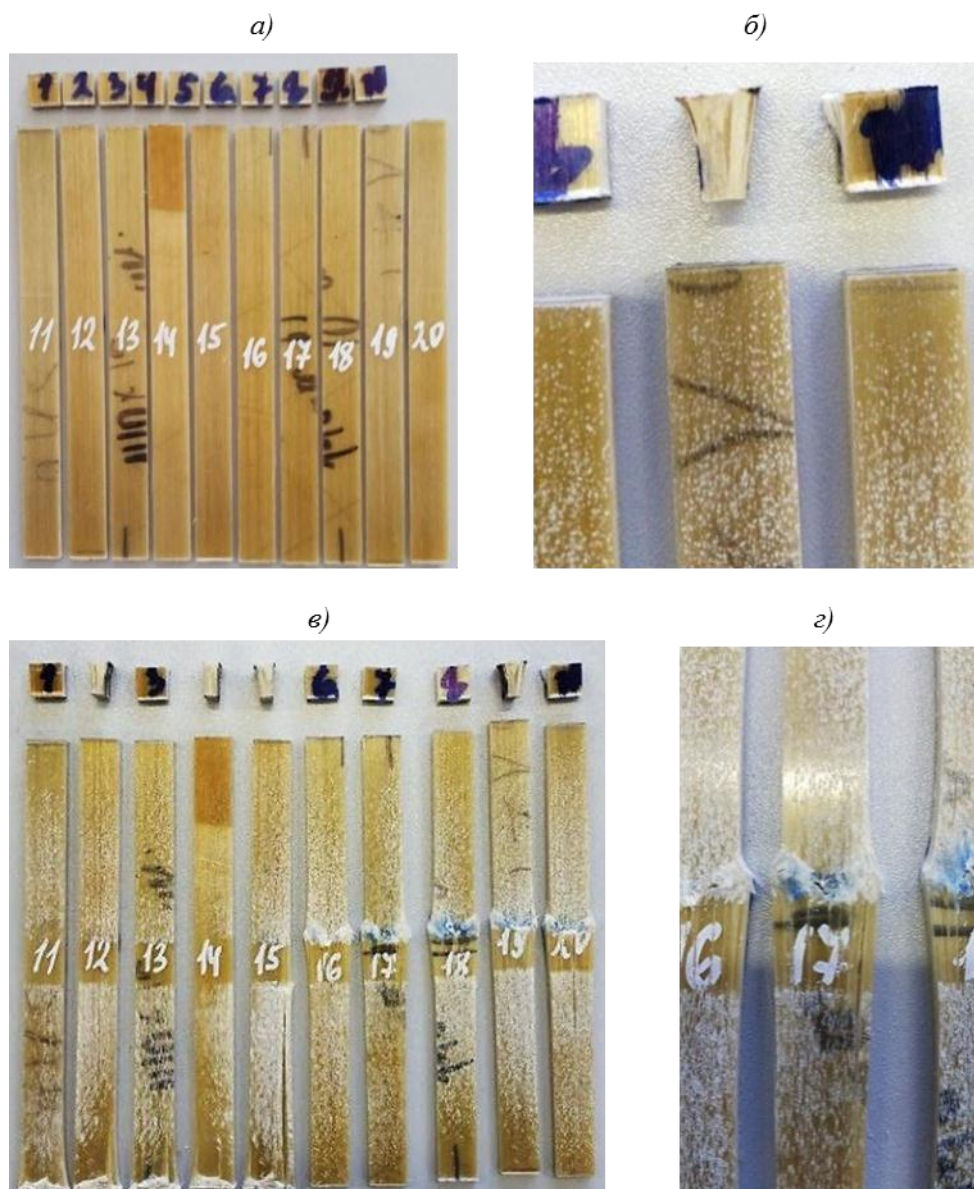


Рис. 3. Образцы стеклопластика ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200 до (а) и после испытаний (б, в, г)

Результаты проведенных испытаний и их статистическая обработка приведены в табл. 5 (где \bar{X} – среднее значение; S_{n-1} – среднее квадратичное отклонение; CV – коэффициент вариации). Следует отметить, что при испытании стеклопластика ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200 часть образцов, испытанных по ASTM D6641-14, разрушилась в оснастке, что обусловлено их толщиной, которая составляет 4 мм (как и образцы по ГОСТ 4651–2014), и по техническим причинам – отсутствием накладок. Под действием высокой сжимающей нагрузки образцы проскальзывали в зажимах приспособления, однако даже с таким видом разрушения полученные данные показали хорошую сходимость и оказались намного выше данных, полученных по ГОСТ 4651–2014.

Таблица 5

Результаты проведенных механических испытаний образцов стеклопластиков

Стеклопластик	Условный номер образца	σ , МПа, по ГОСТ 4651–2014 (гармонизированный с ISO 604)	F^{cu} , МПа, по ASTM D6641-14	σ_B^c , МПа, по ГОСТ 25.602–80
ВПС-53/120	1	484	552	502
	2	491	539	553
	3	489	518	540
	4	520	522	533
	5	482	495	554
	6	508	532	580
	7	487	591	567
	8	472	581	523
	9	475	525	565
	10	490	438	558
	\bar{X}	490	530	545
S_{n-1}	14,5	43,2	23,2	
CV, %	2,95	8,16	4,25	
ВПС-61/Т-25	1	650	777	815
	2	704	625	820
	3	599	867	835
	4	518	675	785
	5	583	716	820
	6	578	702	795
	7	518	732	720
	8	494	630	790
	9	610	677	810
	10	587	702	800
	\bar{X}	585	710	800
S_{n-1}	63,7	71,3	31,8	
CV, %	10,90	10,03	3,98	
ЭТАЛ-245/ РВМПН10-1200	1	164	722*	–
	2	178	813*	
	3	269	870*	
	4	248	860*	
	5	185	891*	
	6	374	899	
	7	297	862	
	8	296	929	
	9	191	847	
	10	282	941	
	\bar{X}	250	865	
S_{n-1}	67,8	62,6		
CV, %	27,29	7,24		

* Разрушение в торцевой зоне образца из-за проскальзывания в оснастке.

Обсуждение и заключения

Для материалов с низким значением разрушающего напряжения и низким модулем упругости (ВПС-53/120) снижение значений, полученных по ГОСТ 4651–2014, может быть не более 10%, для ВПС-61/Т-25 – это уже 27%, однако для жестких и высокопрочных материалов (ЭТАЛ-245/РВМПН10-1200) расхождение по свойствам может достигать и >70%. Рассматривая максимальные прочностные характеристики и их коэффициент вариации, можно судить о том, что ГОСТ 25.602–80 позволяет определять наиболее достоверные механические характеристики материала с минимальным разбросом данных, а результаты испытаний, полученные по ASTM D6641-14, показали приемлемую сходимость с данными, полученными по ГОСТ 25.602–80. Однако в ГОСТ 25.602–80 стоит ссылка, указывающая на то, что стеклопластики стоит испытывать только по стандарту ГОСТ 4651–2014, при этом следует отметить, что ГОСТ 25.602–80

с момента его разработки (1980 г.) не пересматривался. В свою очередь, стандарт ГОСТ 4651–2014 претерпел ряд изменений в ходе его пересмотра и гармонизации со стандартом ISO 604. ГОСТ 4651–2014 разрабатывали в первую очередь для неармированных или дисперсно армированных полимерных материалов, он не рассчитан на испытание высокопрочных и высокомодульных слоистых материалов. Ограничение на испытание композиционных материалов, рассматриваемых в данной статье, по стандарту ГОСТ 4651–2014 указано в разделе 1 этого стандарта, в котором также действует ссылка на другие стандарты, а именно ISO 14126. Соответственно, проведение испытаний образцов стеклопластиков по этому стандарту не корректно, что подтверждают результаты, приведенные в табл. 5, и характер разрушений на рис. 1–3. Поскольку образцам не обеспечивается надлежащая соосность в процессе испытаний, напряжения в образце стеклопластика распределяются неравномерно, что вызывает перекосы и повышение влияния «паразитных» сдвиговых напряжений и кручения. Внешние слои стеклопластика начинают сдвигаться, образуя при этом множественные межслойные трещины. Это необратимо приводит к появлению расслоений и преждевременному нарушению сплошности композиционного материала.

Во ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «НПО Стеклопластик» и Объединением юридических лиц «Союз производителей композитов» подготовлен ГОСТ Р 56812 «Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке», который начал действовать с 01.01.2017 г. Данный стандарт является модифицированным по отношению к стандарту ASTM D6641-14 [17]. В результате, испытание на сжатие высокопрочных (>500 МПа) и высокомодульных (>40 ГПа) композиционных материалов (стеклопластиков) предпочтительно проводить по стандарту ГОСТ Р 56812 (ASTM D6641-14).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что испытания на сжатие стеклопластиков, армированных кордными тканями и однонаправленными ровингами, по стандарту ГОСТ 4651–2014 приводит к получению заниженных результатов и высокому разбросу данных. При этом в ГОСТ 25.602–80 указано ограничение на испытание стеклопластиков, поэтому наиболее оптимальным отечественным стандартом для определения упруго-прочностных характеристик слоистых стеклопластиковых материалов методом комбинированного нагружения при сжатии является ГОСТ Р 56812, с учетом соблюдения соосности системы нагружения и требований к размерам рабочей зоны образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
5. Курносоев А.О., Мельников Д.А. Характеристики стеклопластиков на основе высокодеформативных расплавных связующих в условиях воздействия эксплуатационных факторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №11. С. 14–17.
6. Курносоев А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2016). DOI 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.

7. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 732 с.
8. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2012. №3. С. 72.
9. Ильичев А.В. Сравнение стандартов ГОСТ и ASTM для проведения механических испытаний ПКМ на растяжение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №8. С. 2–9.
10. Ильичев А.В., Раскутин А.Е., Гуляев И.Н. Сравнение геометрических размеров образцов ПКМ, используемых в международных стандартах ASTM и отечественных ГОСТ // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4 (16). Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения 15.12.2016).
11. Калгин А.В., Кудрин А.М., Солопченко А.В., Яблокова 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.
12. Кулакова Е.В., Воскобойник М.Ю., Кудрин А.М. Определение прочностных характеристик полимерных композиционных материалов на основе препрегов марок КМКУ и ЛУ/П в широком интервале температур в соответствии со стандартом ASTM D6641 // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. №4. С. 66–68.
13. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1975. 264 с.
14. ГОСТ 4651–2014. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. М., 1982. 16 с.
15. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Юрков Г.Ю., Целикин В.В. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования // Авиационная промышленность. 2013. №2. С. 12.
16. ASTM D6641-14. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture.
17. ГОСТ Р 56812–2015. Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке. М., 2015. 16 с.
18. ГОСТ 25.602–80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М., 1980. 18 с.
19. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Стеклопластики на основе цианэфирных связующих // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 19–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-19-23.
20. Мелехина М.И., Кавун Н.С., Ракитина В.П. Стеклопластики на основе новых типов термоактивных связующих для перспективных изделий авиационной техники // Композитный мир, 2013. №4. С. 20–23.