

УДК 678.8:620.1

В.Д. Крылов¹, Н.О. Яковлев¹, Ю.А. Курганова², О.А. Лашов¹**МЕЖСЛОЕВАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-79-85

Рассмотрены методы определения статической межслоевой трещиностойкости (вязкости разрушения) слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при нагружении в условиях отрыва, поперечного сдвига и комбинированного нагружения. Для конструктивных ПКМ на основе углеродных жгутов марок HTS45, T800 и тканей фирмы Porsher (арт. 4510, 3692, 14535, 7781) с высокодеформативной эпоксидной матрицей ВСЭ-1212 с повышенной вязкостью разрушения и триазиновой (изоциануратной) матрицей ВСТ-1208 определены значения межслоевых трещиностойкостей G_{Ic} и G_{IIc} .

Ключевые слова: слоистый полимерный композиционный материал, трещиностойкость, межслоевая вязкость разрушения, отрыв, поперечный сдвиг, мода I, мода II.

Methods for determining the static interlayer fracture toughness of laminated polymer composite materials (PCM) under loading in tearing-off condition, lateral shear and combined loading have been considered. The rates of interlayer fracture toughness G_{Ic} and G_{IIc} for structural PCM based on carbon fibre HTS45, T800 and fabrics of Porsher (art. 4510, 3692, 14535, 7781) and epoxy matrix VSE-1212 with high fracture toughness and triazine (isocyanurate) matrix VST-1208 have been determined.

Keywords: layered polymer composite, crack resistance, interlayer fracture toughness, tearing-off, lateral shear, mode I, mode II.

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education Bauman Moscow State Technical University] E-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

В последние годы наблюдается постоянный рост использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности: авиации, судостроении, строительстве и др. [1–8]. Например, в перспективных изделиях авиационной техники закладываемая при проектировании весовая доля ПКМ превышает 50%. Связано это с ужесточением предъявляемых требований по весовой эффективности, для удовлетворения которых необходимы материалы с высоким уровнем удельных свойств.

Одной из важнейших характеристик ПКМ, оцениваемой при его паспортизации и специальной квалификации, является межслоевая вязкость разрушения (удельная работа расслоения). Важность данной характеристики определяется условием приложения нагрузки на образец ПКМ, при котором наряду с характеристиками сдвига в плоскости листа [9, 10] и удара падающим грузом [11] нагружаются наиболее слабые места – матрица и межфазная зона. Таким образом, характеристика отражает «работоспособность» ПКМ в наиболее опасных условиях нагружения. Распространение межслойной трещины в ПКМ может

быть оценено величиной движущей силы, выраженной скоростью высвобождения упругой энергии [12].

В настоящее время существует довольно много подходов по оценке трещиностойкости [12, 13]. Анализ нормативной и технической документации на методы определения характеристик трещиностойкости ПКМ при разрушении в условиях отрыва (мода I) и поперечного сдвига (мода II) показывает, что межгосударственные (ГОСТ) и национальные (ГОСТ Р) стандарты отсутствуют, применяются стандарты организаций: РТМ1.2.092–86, ММ1.2.019–2002, ММ1.2.047–2005, СТО ВИАМ 1-595-30-421–2012, многие из которых не соответствуют зарубежному уровню [14], требуют существенной доработки.

Наиболее часто для определения характеристик трещиностойкости используют стандарты ASTM D 5528, ASTM D 7905, ASTM D 6671, ISO 15114. В табл. 1 приведены эскизы образцов и схемы нагружения для стандартных методов определения трещиностойкости ПКМ.

Метод DCB (изложен в стандартах ASTM D 5528/D 5528M, ASD-STAN prEN 6033, AITM 1.0005) позволяет определить критическое

Таблица 1

Методы определения межслоевой вязкости разрушения

Мода	Обозначение метода/ стандарт на метод испытания	Образец и схема его нагружения
I	Двухконсольная балка – Double Cantilever Beam (DCB), ASTM D 5528/D 5528M	
II	Трехточечный изгиб образца в виде балки с расслоением – End notched flexure (ENF), ASTM D 7905/D 7905M, СТО ВИАМ 1-595-30-421–2012	
	Одноконсольное торцевое нагружение – End-load split (ELS), ISO 15114	
I+II	Нагружение по смешанной моде I+II – Mixed Mode Bending (MMB), ASTM D 6671/D 6671M	

значение межслоевой вязкости разрушения G_{Ic} при испытании в условиях разрушения по моде I (нагружение отрывом) образца в виде двухконсольной балки шириной b и толщиной $2h$. В данном методе трещина расслоения длиной a распространяется за счет действия только нормальных напряжений. Усилие раскрытия прикладывается к образцу через петли, блоки нагружения или «вилки», приклеиваемые к противоположным поверхностям на одном конце образца.

Метод ENF (стандарты ASTM D 7905/D 7905M, СТО ВИАМ 1-595-30-421–2012) позволяет определить межслоевую вязкость разрушения G_{IIc} при разрушении по моде II (нагружение поперечным сдвигом) по схеме трехточечного изгиба. В вершине трещины возникают касательные напряжения, за счет чего реализуется чистый поперечный сдвиг.

Метод ELS (ISO 15114) позволяет определить межслоевую вязкость разрушения G_{Ic} при разрушении по моде II (нагружение поперечным сдвигом) за счет одноконсольного приложения торцевой нагрузки.

Метод MMB (ASTM D 6671/D 6671M) позволяет определить межслоевую вязкость разрушения (смешанная мода I+II) в условиях комбиниро-

ванного разрушения (нагружение отрывом и сдвигом) с варьированием соотношения мод.

Из рассмотренных методов в настоящее время наиболее часто применяют методы DCB и ENF особенно при общей и специальной квалификации. В данной работе проведены испытания по определению характеристик межслоевой трещиностойкости по данным методам.

Материалы и методы

Испытания на трещиностойкость ПКМ по методам DCB и ENF проводили на универсальной электродинамической испытательной машине Instron ElectroPuls E10000 (рис. 1) [15].

Для испытаний использовали образцы в виде полосы прямоугольного сечения длиной 250 мм, шириной 25 мм и толщиной 5,5 мм с трещиной, начальная длина которой составляла ~60 мм. К балкам – частям образца – через скобы прикладывали нагрузку раскрытия P при скорости нагружения 2 мм/мин. На рис. 2 представлены типовые диаграммы «нагрузка–раскрытие трещины», полученные при испытании образцов углепластика ВКУ-25 и стеклопластика ВПС-47/7781.

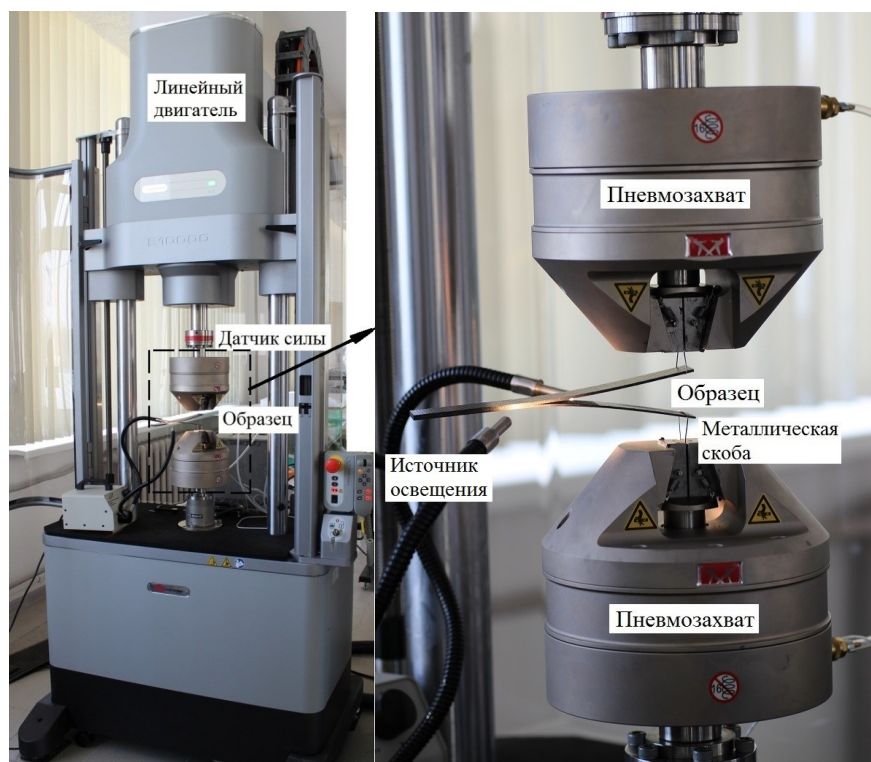


Рис. 1. Испытательная машина с образцом ПКМ при испытании на трещиностойкость по методам DCB и ENF

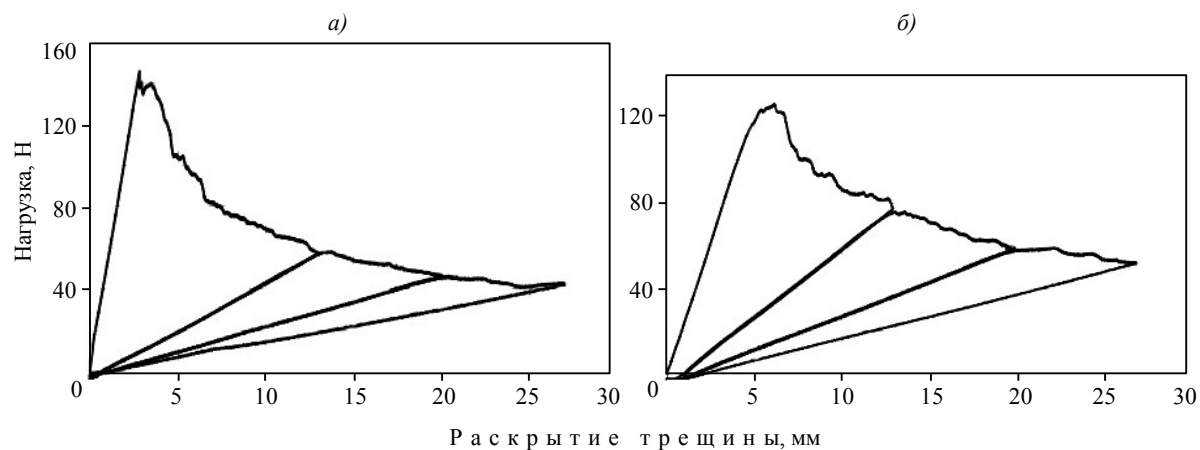


Рис. 2. Диаграммы «нагрузка–раскрытие трещины» для образцов из углепластика ВКУ-25 (а) и стеклопластика ВПС-47/7781 (б)

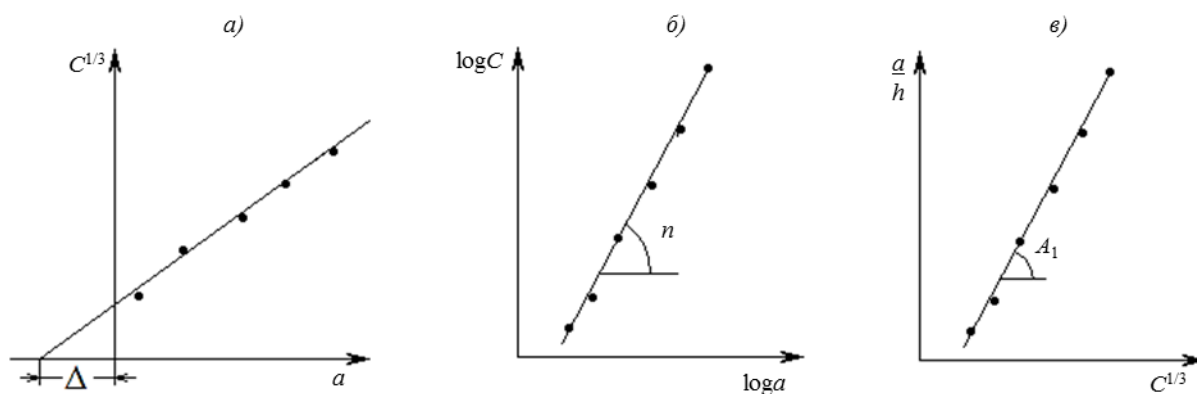


Рис. 3. Схемы определения поправки $|\Delta|$ к длине трещины (а), коэффициента n (б) и коэффициента A_1 (в)

Межслоевую вязкость разрушения G_{Ic} определяли согласно методу модифицированной балочной теории (метод A_1), методу калибровки податливости (метод B_1) и методу модифицированной калибровки податливости (метод B_1).

В методе модифицированной балочной теории для исключения поворота балки на фронт трещины при неидеальном закреплении образца в захватах использовали скорректированную длину трещины $(a+|\Delta|)$. Межслоевую вязкость определяли по формуле:

$$G_{Ic} = \frac{P_c}{2b} \cdot \frac{3\delta}{a+|\Delta|}, \quad (1)$$

где P_c – критическая нагрузка, Н; b – ширина образца, мм; δ – раскрытие трещины, мм; $|\Delta|$ – поправка к длине трещины, равная расстоянию от начала координат до пересечения линейной зависимости экспериментальных данных в координатах $C^{1/3}$ от длины трещины a с осью абсцисс (рис. 3, а); C – податливость образца.

Трещиностойкость по методу калибровки податливости (метод B_1) определяли по формуле:

$$G_{Ic} = \frac{P_c}{2b} \cdot \frac{n\delta}{a}, \quad (2)$$

где n – тангенс угла наклона линейной зависимости экспериментальных данных в координатах логарифм податливости от логарифма длины трещины (рис. 3, б).

Согласно методу модифицированной калибровки податливости (метод B_1) трещиностойкость определяли по формуле:

$$G_{Ic} = \frac{3P_c^2 C^{2/3}}{2A_1 b h} = \frac{P_c}{2b} \cdot \frac{3P_c C^{2/3}}{A_1 h}, \quad (3)$$

где A_1 – тангенс угла наклона линейной зависимости экспериментальных данных в координатах a/h от $C^{1/3}$ (рис. 3, в); a – длина трещины; h – толщина образца.

Межслоевую вязкость разрушения по моде II определяли согласно СТО ВИАМ 1-595-30-421–2012 на образцах в виде однонаправленной полосы прямоугольного сечения длиной 250 мм, шириной 25 мм и толщиной 6 мм с трещиной, начальная длина которой составляла 45 мм. Для этого образец с расслоением нагружали по схеме трехточечного изгиба при скорости перемещения нагружающего валика 2 мм/мин. Длину трещины измеряли с точностью до 0,5 мм непосредственно при испытании.

Межслоевую вязкость разрушения G_{IIc} определяли методами, основанными на измерении длины трещины и податливости образца.

В первом случае G_{IIc} определяли по формуле:

$$G_{IIc} = \frac{P}{2b} \cdot 3mPa_{изм}^2, \quad (4)$$

где m – коэффициент, равный тангенсу угла наклона линейной зависимости экспериментальных данных от измеренной длины трещины $a_{изм}^3$, Н⁻¹·мм⁻².

Трещиностойкость методом, основанным на измерении податливости образца, определяли по формуле:

$$G_{IIc} = \frac{P}{2b} \cdot 3P(C-C_0)^{2/3} m^{1/3}, \quad (5)$$

где C_0 – отрезок, отсекаемый от оси ординат линейной зависимостью экспериментальных данных в координатах C от $a_{изм}^3$.

Следует отметить, что метод, основанный на измерении податливости образца, является предпочтительным, поскольку длину трещины не всегда можно определить достоверно, а использование современной техники позволяет измерять податливость с высокой точностью.

В табл. 2 приведены данные по маркам исследованных материалов, типам армирующих наполнителей и полимерных матриц.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований определены экспериментальные значения характеристик трещиностойкости G_{Ic} и G_{IIc} , а также коэффициенты вариации v , которые приведены в табл. 3 и 4. Видно, что в большинстве случаев коэффициенты вариации для характеристик G_{Ic} и G_{IIc} превышают 5%, а для некоторых случаев, например – углепластиков ВКУ-25 и ВКУ-39, коэффициент вариации превышает 10%, что свидетельствует о высокой нестабильности процессов страгивания и роста межслоевой трещины в ПКМ как на основе ткани, так и на основе жгутов. Причиной этого может являться повышенная дефектность полимерной матрицы, возникшая в процессе производства ПКМ, низкие деформативно-прочностные характеристики межфазной зоны, а также стеснение полимерной матрицы волокном.

Из данных табл. 3 и 4 видно, что углепластики ВКУ-39 и ВКУ-29 обладают наибольшими значениями характеристик трещиностойкости. Так, углепластик ВКУ-39 на основе равнопрочной ткани обладает максимальной работой расслоения при отрыве (мода I), углепластик ВКУ-29 на основе однонаправленной ткани – при поперечном сдвиге (мода II).

Полученные значения характеристик статической трещиностойкости показали, что для современных конструкционных ПКМ на тканой и углеродной основах с полимерной матрицей отношение G_{IIc}/G_{Ic} находится в диапазоне от 1,4 до 3,7 (табл. 5). При этом для ПКМ с армирующим наполнителем в виде равнопрочной ткани данное отношение находится в диапазоне от 1,4 до 1,7, а для ПКМ с наполнителем в виде углеродного жгута и однонаправленной ткани (преимущественное распределение волокон в направлении основы) – в диапазоне от 2,2 до 3,7.

Таблица 2

Исследуемые материалы

Материал	Армирующий наполнитель	Полимерная матрица
ВКУ-25	Углеродный жгут HTS45	Эпоксидная матрица с повышенной вязкостью разрушения для силовых конструкций марки ВСЭ-1212
ВКУ-28	Углеродный жгут T800	
ВКУ-29	Однонаправленная ткань Porsher арт. 4510 с утком из стекловолокна	
ВКУ-39	Равнопрочная углеродная ткань Porsher арт. 3692	
ВКУ-27л	Однонаправленная ткань Porsher арт. 14535 с утком из стекловолокна	Триазиновая (изоциануратная) матрица марки ВСТ-1208
ВПС-47/7781	Равнопрочная стеклянная ткань Porsher арт. 7781	

Таблица 3

Трещиностойкость G_{Ic} полимерных композиционных материалов

Материал	Метод А _I		Метод Б _I		Метод В _I	
	G_{Ic} , Дж/мм ²	ν , %	G_{Ic} , Дж/мм ²	ν , %	G_{Ic} , Дж/мм ²	ν , %
ВКУ-25	0,39	11,3	0,41	9,8	0,38	8,3
ВКУ-27л	0,28	6,1	0,29	7,1	0,28	6,2
ВКУ-28	0,25	5,7	—	—	—	—
ВКУ-29	0,66	3,6	0,70	6,5	0,68	4,1
ВКУ-39	1,05	11,2	1,09	10,8	1,07	10,2
ВПС-47/7781	0,85	5,6	0,88	6,3	0,88	5,4

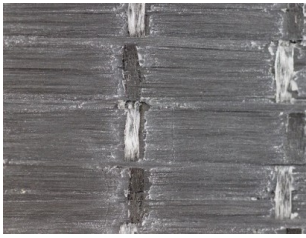
Таблица 4

Трещиностойкость G_{IIc} полимерных композиционных материалов

Материал	Метод А _{II}		Метод Б _{II}	
	G_{IIc} , Дж/мм ²	ν , %	G_{IIc} , Дж/мм ²	ν , %
ВКУ-25	0,92	10,2	0,92	11,7
ВКУ-27л	0,85	8,9	0,86	9,4
ВКУ-28	0,76	5,6	0,78	3,2
ВКУ-29	2,39	12,1	2,42	13,2
ВКУ-39	1,77	13,3	1,73	12,3
ВПС-47/7781	1,30	6,9	1,26	6,5

Таблица 5

**Отношения трещиностойкостей полимерных композиционных материалов
по модам I и II**

Материал	Тип армирующего наполнителя	G_{II}/G_I		Фотографии образцов
		минимальное значение	максимальное значение	
ВПС-47/7781	Равнопрочная ткань	1,4	1,5	
ВКУ-39		1,6	1,7	
ВКУ-25	Углеродный жгут	2,2	2,4	
ВКУ-27л	Однонаправленная ткань	2,9	3,1	
ВКУ-28	Углеродный жгут	3,0	3,1	
ВКУ-29	Однонаправленная ткань	3,4	3,7	

Заключение

Показано, что существующие методы расчета трещиностойкостей по модам I и II (G_{Ic} и G_{IIc}) с учетом коэффициентов вариации дают сравнимые результаты для современных конструкционных ПКМ.

В то же время значение коэффициента вариации в ряде случаев превышает 10%, что может свидетельствовать о сильной нестабильности процессов межслоевого разрушения – зарождения трещины и ее роста в полимерной матрице и межфазной зоне.

По полученным значениям характеристик статической трещиностойкости видно, что для современных конструкционных ПКМ с армирующим наполнителем в виде равнопрочной ткани отношение G_{IIc}/G_{Ic} находится в диапазоне от 1,4 до 1,7, а для ПКМ с наполнителем в виде углеродного жгута и однонаправленной ткани (преимущественное распределение волокон в направлении основы) – в диапазоне от 2,2 до 3,7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
2. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
3. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ 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.
5. Димитриенко Ю.И., Федонюк Н.Н., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А., Ерасов В.С., Яковлев Н.О. Моделирование и разработка трехслойных композиционных материалов с сотовым наполнителем // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2014. №5 (56). С. 66–81.
6. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
7. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
8. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
9. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Крылов В.Д., Попов Ю.А. Методы определения сдвиговых характеристик полимерных композиционных материалов // Авиационная промышленность. 2014. №1. С. 20–23.
10. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Колокольцева Т.В. Особенности определения характеристик сдвига в плоскости листа полимерных композиционных материалов в различных стандартах // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №5. С. 12–16.
11. Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 60–64.
12. Финогенов Г.Н., Ерасов В.С. Трещиностойкость полимерных композитов при межслойных отрыве и сдвиге /В сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2003. №3. С. 62–67.
13. Яковлев Н.О., Луценко А.Н., Артемьева И.В. Методы определения межслоевой трещиностойкости слоистых материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. Приложение «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2015. №10. С. 7–14.
14. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Петрова А.П. Сравнение нормативных баз различных стран по испытанию клеевых соединений материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №7. С. 2–8.
15. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Автаев В.В. Современное состояние лаборатории имени профессора С.И. Кишкиной // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 136–139.