

УДК 699.81:678.747.2

С.Л. Барботько¹, О.С. Вольный¹, П.С. Мараховский¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЮЧЕСТИ УГЛЕПЛАСТИКА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-103-110

Исследовано влияние структуры армирования углепластика ВКУ-25/SYT49S на основе связующего ВСЭ-1212 и высокопрочного углеродного жгута SYT49S на характеристики горючести, определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм. Показано существенное влияние схемы армирования на величину продолжительности остаточного горения и длину прогорания. Установлено, что во всем диапазоне исследованных толщин материала (от 1 до 4 мм) образцы однонаправленного материала с ориентацией углеродного наполнителя [0] имеют существенно худшие значения пожаробезопасности по сравнению с образцами с ориентацией [90] или с равнопрочным материалом (квазиизотропная укладка).

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, пожаробезопасность, горючесть, укладка, структура армирования.

S.L. Barbotko¹, O.S. Volnyj¹, P.S. Marakhovskii¹**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF THE REINFORCEMENT SCHEME
ON THE COMBUSTIBILITY CHARACTERISTICS
OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER MATERIAL**

The influence of the structure of carbon fiber reinforced plastic VKU-25/SYT49S based on the binder VSE-1212 and high-strength carbon harness SYT49S on the flammability characteristics determined in accordance with the requirements of aviation regulations. The significant effect of the scheme of reinforcement on the value of the residual duration of combustion and the length of the burn-out. It is established that in the entire range of the studied material thicknesses (from 1 to 4 mm) the samples of unidirectional material with the orientation of the carbon filler [0] have significantly worse fire safety values compared to the samples with the orientation [90] or with an equally strong material (quasi-isotropic laying).

Keywords: polymeric composite material, carbon reinforced polymeric material, fire safety, flammability, scheme of laying, reinforcement structure.

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 авиационной отрасли, как в одной из наиболее высокотехнологичных отраслей промышленности, в первую очередь происходит внедрение передовых промышленных технологий. Одним из направлений совершенствования авиационной техники является широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) взамен сталей и алюминиевых сплавов, обычно используемых для изготовления конструктивных элементов. Углепластики за счет меньшей плотности обеспечивают

существенное снижение конечной массы изделия. Так, доля полимерных материалов, использованных в конструкции самолета В-787 фирмы Boeing, по массе составляет 50%, а по объему 80%. Планируется, что в ближайшее десятилетие массовая доля полимеров в конструкциях пассажирских самолетов достигнет 80% [1]. Уже имеются примеры образцов авиационной техники, выполненных практически полностью из полимерных материалов [2]. Для военной техники применение ПКМ наряду с уменьшением массы обеспечивает также и снижение радиозаметности, поэтому в конструкциях военных самолетов и вертолетов также увеличивается применение полимерных материалов [3, 4]. Во ФГУП «ВИАМ» постоянно проводятся исследования и разработан комплекс новых перспективных полимерных материалов, обеспечивающих возможность создания современной отечественной конкурентоспособной авиационной техники [5–7].

Ряд ученых-материаловедов и конструкторов считают, что замена металлов и сплавов на полимерные материалы, наряду с повышением экономичности, может повысить надежность и безопасность воздушного судна [8, 9], но эти предположения не являются бесспорными [9].

Одной из важных составляющих обеспечения безопасности авиационной техники, экипажа и перевозимых пассажиров является пожарная безопасность применяемых материалов, узлов, конструктивных элементов и всего изделия в целом, обеспечивающая выживаемость пассажиров и экипажа, а также минимизацию возможного ущерба, получаемого воздушным судном при авиационном происшествии или наносимого окружающей среде. На решение этих проблем в течение многих десятилетий направлены силы как зарубежных, так и отечественных ученых [5–7, 10–12].

В настоящее время одним из наиболее распространенных и одновременно наиболее опасных вариантов пожара авиационной техники является пожар, возникающий при авиационных происшествиях во время рулежки, взлета или посадки воздушного судна – так называемый «наземный пожар». Наземные авиационные происшествия зачастую сопровождаются разрушением конструкций, вследствие чего и происходит утечка авиационного топлива. В случае воспламенения топлива развивается высокоинтенсивный углеводородный пожар, при котором на внешнюю поверхность фюзеляжа и крыла воздействует мощный тепловой поток [13, 14]. Под действием высоких температур и лучистого теплового потока от пламени обшивки фюзеляжа и крыла воздушного судна, выполненные из алюминиевых сплавов, быстро (в течение 30–60 с) прогорают, после чего происходят деформация и разрушение силового набора и проникновение пламени во внутренние отсеки [15]. Катастрофа, произошедшая в мае 2019 г. в аэропорту Шереметьево с самолетом Суперджет-100 (RRJ-95), наглядно продемонстрировала опасность и тяжелые последствия именно такого пожара [16, 17].

Применение ПКМ (углепластиков или стеклопластиков) или слоистых металл-полимерных гибридных материалов (типа СИАЛ или GLARE) взамен алюминиевых сплавов обеспечивает многократное повышение огнестойкости и способно предотвратить проникновение открытого пламени во внутренние отсеки авиационной техники [18, 19]. Эти выводы подтверждены и российскими учеными – как выполненными расчетами, так и лабораторными огневыми испытаниями перспективных конструктивных элементов капота вертолетного двигателя [20, 21].

Однако стойкость материала к сквозному прогоранию (огнестойкость и огнестойкость) является только одной из нескольких характеристик пожарной опасности. Другими, не менее важными характеристиками являются: горючесть – способность материала воспламениться, распространять пламя и самостоятельно

затухать при удалении источника воспламенения; тепловыделение при горении; дымообразующая способность и токсичность продуктов горения. Для того чтобы в результате воздействия источника воспламенения вся поверхность воздушного судна, выполненная из полимерных материалов, не оказалась объята пламенем, важно выполнение требований по ограничению горючести, так как эвакуация пассажиров в таких условиях становится практически невозможной. Выполнение требований по ограничению интенсивности и общего количества выделяющегося при горении тепла необходимо для обеспечения условия по медленному развитию очага пожара во внутренних отсеках, что вместе с низкими значениями дымообразующей способности и токсичности продуктов горения обеспечивает достаточное время для эвакуации пассажиров из потерпевшего аварию воздушного судна.

Характеристики пожарной опасности полимерных материалов зависят не только от химического состава полимерной матрицы, но также от толщины, состава и структуры примененного ПКМ, а также от варианта методики проведения испытаний [22].

В работе [22] рассмотрено влияние поверхностной плотности наполнителя на величины регистрируемых характеристик горючести, дымообразования и тепловыделения. Показано, что использование тканых наполнителей с меньшей поверхностной плотностью (выполненных из тонких или полых волокон) способно существенно снизить пожарную опасность ПКМ по всем нормируемым характеристикам.

Обычно влияние структуры материала на величину регистрируемой характеристики пожарной опасности не учитывается, одно из исключений – это текстильные материалы (ткани и ковры), для которых в обязательном порядке требуется проведение испытаний с целью определения значений характеристик в продольном (основа) и поперечном (уток) направлениях. Имеются данные, что скорость распространения пламени по поверхности ориентированных органических стекол зависит от степени и направления ориентирования (вытяжки). Влияние структуры полимерного материала на регистрируемые величины характеристик пожарной опасности выявлено для получаемых по аддитивным технологиям полимерных материалов [23], которые по своей сути из-за применяемой технологии производства являются анизотропными. Установлено существенное различие в величине регистрируемых характеристик горючести (продолжительность остаточного горения, длина прогорания, продолжительность горения падающих капель) в зависимости от варианта изготовления образца при помощи 3D-принтера.

Наиболее распространенными вариантами повышения пожарной безопасности полимерных материалов являются способы антипирирования (введение огнегасящих добавок или химическая модификация полимера за счет прививки атомов или функциональных групп, тем или иным способом способствующих прекращению процессов горения) и повышения термостойкости полимерной матрицы. Однако первый способ, как правило, приводит к ухудшению служебных характеристик (прежде всего механической прочности), а второй – к значительному удорожанию материала [24–26].

В качестве альтернативного варианта изменения пожарной опасности ПКМ может являться изменение их структуры за счет изменения схемы армирования и/или выбора армирующего наполнителя. Поэтому проведение исследований по изучению влияния анизотропии материалов на величины нормируемых характеристик пожарной опасности является крайне актуальным.

Как было ранее показано в работе [27], изменение структуры армирования (схемы укладки) даже с использованием равнопрочной ткани может несколько изменять все величины характеристик пожарной опасности стеклопластика. Данная работа посвящена исследованию влияния структуры армирования и схемы укладки углеродного жгута в углепластике на характеристики горючести.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль», комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [28–30].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран углепластик ВКУ-25/SYT49S на основе связующего ВСЭ-1212 и высокопрочного углеродного жгута SYT49S [31].

При изготовлении образцов изменяли следующие параметры:

- количество слоев углеродного жгута, а соответственно, толщину и поверхностную плотность материала;
- укладку жгута.

Для проведения исследований изготовлены образцы углепластика с однонаправленной структурой армирования (толщиной около 1, 2 и 4 мм), а также с квазиизотропной структурой армирования ([0/-45/90/+45]) толщиной 3,2 мм. Из плит с однонаправленной структурой армирования, в соответствии с нормативной документацией на проведение испытаний, вырезаны образцы размером 305×90 мм в продольном ([0]) и поперечном ([90]) направлениях армирования. Образцы, вырезанные из плиты с квазиизотропной укладкой, имели аналогичные геометрические размеры.

Огневые испытания образцов материалов для определения характеристик горючести проводили в соответствии с требованиями, описанными в Авиационных правилах (АП-25 п. 25.853(a)), Приложение F, Часть I [32], по методике, изложенной в ГОСТ Р 57924–2017 (метод 2 – испытания в вертикальном положении) и Aircraft Materials Fire Test Handbook [33]. Испытания проводили на оборудовании марки AA07 производства фирмы Noselab. В соответствии с требованиями Авиационных норм АП-25 при испытаниях композиционных материалов, продолжительность экспозиции пламенем горелки составляла 60 с. В процессе испытания регистрировали продолжительность остаточного (самостоятельного) горения и длину прогорания образца. В соответствии с требованиями проведения сертификационных испытаний материалов авиационного назначения на пожаробезопасность [32, 34, 35], испытаниям принято подвергать не менее чем по три параллельных образца. В целях повышения достоверности полученных результатов, для однонаправленных образцов с ориентацией [0] количество испытанных образцов увеличено до пяти.

Для определения влияния структуры армирования на теплопроводность изготовлены образцы однонаправленного углепластика ВКУ-25 на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродного жгута Т-800. Образцы представляли собой диски диаметром 25,4 мм с толщиной от 1 до 4 мм. Все испытания проводили с использованием оборудования фирмы Netzsch Gerätebau GmbH.

Испытания выполняли по следующим методикам.

Теплопроводность углепластиков рассчитывали по формуле

$$\lambda(T) = a(T) \cdot C(T) \cdot \rho(T), \quad (1)$$

где T – температура, °С; $a(T)$ – температуропроводность, м²/с; $C(T)$ – теплоемкость, кДж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность материала, кг/м³.

Температуропроводность определяли импульсным методом на установке LFA457 по ГОСТ Р 57943–2017. Теплоемкость измеряли на дифференциальном сканирующем калориметре DSC204 по ГОСТ Р 56754–2015. Плотность при комнатной температуре определяли гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 20018–74.

Плотность при температуре T рассчитывали по результатам измерения коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР), определяемого на dilatометре DIL402 по ГОСТ 32618.2–2014:

$$\rho(T)=G/V(T); \quad (2)$$

$$V(T)=\prod_{i=1}^3(l_i); \quad (3)$$

$$l_i=l_{0i}[1+\alpha_i(T)\cdot\Delta T], \quad (4)$$

где G – масса образца, кг; $V(T)$ – объем образца, м³; l_{0i} , l_i – размер образца при комнатной и повышенной температуре соответственно, м; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного теплового расширения, К⁻¹.

Результаты и обсуждение

Полученные данные по характеристикам горючести образцов углепластика ВКУ-25/SYT49S приведены в табл. 1. Видно, что результаты испытаний однонаправленного материала как по продолжительности остаточного горения, так и по длине прогорания существенно различаются в зависимости от направления вырезки ([0] или [90]) и, соответственно, экспонирования и распространения пламени по поверхности образцов для всех трех вариантов толщины.

Таблица 1

Характеристики горючести углепластика ВКУ-25/SYT49S с различными схемами армирования и направлениями вырезки образцов

Структура армирования	Толщина, мм	Характеристики горючести		
		Продолжительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм	
Однонаправленная [0]	0,9–1,1	33	202	
		49	210	
		10	169	
		87	290	
		32	164	
	Среднее значение:		42	207
	2,0–2,1	18	141	
		19	145	
		21	85	
		23	115	
		20	89	
	Среднее значение:		20	115
3,9–4,0	60	55		
	55	69		
	64	66		
	63	59		
	62	49		
	Среднее значение:		61	60
Однонаправленная [90]	0,9–1,1	0	28	
		0	32	
		2	30	
	Среднее значение:		1	30
	2,0–2,1	2	24	
		4	19	
		3	19	
	Среднее значение:		3	21
	3,9–4,0	8	2	
		4	2	
7		2		
Среднее значение:		6	2	
Квазиизотропная [0/-45/90/+45]	3,2	14	12	
		13	12	
		19	14	
	Среднее значение:		15	13

Характеристики горючести для материала с квазиизотропной схемой армирования являются промежуточными между характеристиками для однонаправленного материала с направлениями вырезки [0] и [90].

Видно, что для данного типа ПКМ в исследованном диапазоне толщин образцов наихудшими с точки зрения пожарной безопасности являются условия, когда армирующий элемент (углеродный жгут) расположен вертикально и при поджигании образца пламя распространяется снизу вверх вдоль направления армирования. В этих условиях наблюдаются как наибольшие значения продолжительности остаточного (самостоятельного) горения, так и длины прогорания.

Поскольку химический состав образцов во всех случаях был одинаковым, то было сделано предположение, что на получаемые результаты испытаний оказывает влияние различие в теплопроводности материала вдоль направления распространения пламени.

Результаты измерения теплопроводности образцов однонаправленного материала, выполненного на основе того же связующего ВСЭ-1212 и углеродного жгута Т-800 в различных направлениях при различных температурах, приведены в табл. 2. Видно, что в зависимости от направления измерения теплопроводность материала различается в 2,7–3,8 раза. Наибольшая теплопроводность у материала наблюдается вдоль армирующих компонентов – углеродного жгута, имеющего существенно более высокую теплопроводность, чем полимерная матрица.

Таблица 2

Значения коэффициента теплопроводности однонаправленного углепластика на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродного жгута Т-800

Направление измерения теплопроводности	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при температуре, °С	
	25	125
Вдоль нитей основы	1,40	1,85
Вдоль утка	0,51	0,66
В перпендикулярном (трансверсальном) направлении	0,40	0,49

При проведении испытаний однонаправленного материала с ориентацией [0] именно вследствие высокой теплопроводности материала вдоль армирующего углеродного наполнителя при воздействии иницирующего воспламенение пламени в течение предварительной экспозиции образца происходит прогрев образца в направлении распространения пламени (снизу вверх). Вследствие этого изменяются тепловые условия образца при испытании (подогретый материал), способствующие более длительному самостоятельному горению и распространению пламени на бóльшую высоту.

При испытании однонаправленного материала с ориентацией [90] высокая теплопроводность материала в поперечном (относительно распространения пламени) направлении способствует увеличению теплопотерь от источника воспламенения в боковые зоны, не подвергающиеся горению. Вследствие этого предварительный прогрев полимерной матрицы в зоне, расположенной над источником пламени, существенно снижен, что и приводит к малой продолжительности самостоятельного горения и незначительной длине прогорания.

При испытании материала, имеющего квазиизотропную структуру армирования, прогрев от источника воспламенения происходит практически равномерно по всем направлениям вдоль поверхности образца. Вследствие этого величина прогрева материала над источником воспламенения несколько превосходит величину прогрева однонаправленного материала в случае ориентации [90], но значительно уступает прогреву образца с ориентацией [0].

Заключения

Установлено, что структура армирования ПКМ может существенным образом влиять на величину регистрируемых характеристик горючести.

Пожарная опасность однонаправленных углепластиков с ориентацией [0] относительно предполагаемого направления распространения пламени существенно выше по сравнению с пожарной опасностью того же материала, но имеющего квазиизотропную укладку или однонаправленную структуру армирования в перпендикулярном направлении.

Таким образом, для обеспечения пожарной безопасности при проектировании конструктивных элементов и изделий в обязательном порядке необходимо учитывать влияние структуры армирования и расположения армирующих волокон на характеристики горючести. В целях обеспечения пожарной безопасности конструктивных элементов и изделий целесообразно по возможности избегать однонаправленной структуры армирования с вертикальной ориентацией, как наиболее способствующей длительному горению и распространению пламени.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам ФГУП «ВИАМ» И.Н. Гуляеву, П.Н. Тимошкову, А.А. Платонову за изготовленные и предоставленные образцы для проведения исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Destefany J. Hole in Four ... or More // Cutting Tool Engineering. January 2011. P. 34–40.
2. Gründer M. Immer mehr Kunststoffe // Flug Revue. 2009. Juni. P. 93–95.
3. Lyon R.E. Nongalogen Fire-Resistant Plastics for Aircraft Interiors // Technical Report DOT/FAA/AR-TN08/5. 2008. 33 p.
4. Gründer M. Kunststoff oder Metall? // Flug Revue. 2011. September. P. 74–77.
5. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
7. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
8. Giordano G. Plastics in Defense & Safety // Plastics Engineering. 2011. October. P. 28–31.
9. Decadal Survey of Civil Aeronautics: Foundation for the Future / Steering Committee for the Decadal Survey of Civil Aeronautics, National Research Council of the National Academies. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2006. 212 p.
10. Sarkos G. Evolution of FAA Fire Safety R&D Over the Years: report of the Fifth Triennial Fire & Cabin Safety Research Conference (Atlantic City, Oct. 29 – Nov. 01, 2007). 2007. 56 p. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 30.09.2019).
11. Sarkos G. Aircraft fire Safety R&D: Past, Present & Future: report of the 6th Triennial Fire & Cabin Safety Research Conference. (Atlantic City, Oct. 25–28, 2010). 2010. 26 p. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 30.09.2019).
12. Барботько С.Л. Пожаробезопасность полимерных материалов авиационного назначения и конструктивных элементов на их основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2019. 47 с.
13. Терещнев В.В., Артемьев Н.С., Грачев В.А. Транспорт: наземный, морской, речной, воздушный, метро. Противопожарная защита и тушение пожаров. М.: Пожнаука, 2007. Кн. 6. 383 с.
14. Джафаров М.А., Лозовой Н.Ф., Луценко В.И., Федоров В.К. Обеспечение пожарной безопасности на аэродромах гражданской авиации. М.: Транспорт, 1987. 263 с.

15. Webster H. Fuselage Burnthrough from Large Exterior Fuel Fires // Technical Report DOT/FAA/CT-90-10. 1994. 114 p.
16. Предварительный отчет по результатам расследования авиационного происшествия самолета RRJ-95B RA-89098 / Межгосударственный авиационный комитет. Комиссия по расследованию авиационных происшествий. URL: <http://www.mak-iac.org> (дата обращения: 20.06.2019).
17. Marker T.R. Shot Takes and Current Projects // International Aircraft Materials Fire Test Forum Meeting (Cologne, Germany. June 18, 2019). URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 13.09.2019).
18. Marker T.R. Full-Scale Test Evaluation of Aircraft Fuel Fire Burnthrough Resistance Improvements // Technical Report DOT/FAA/AR-98/52. US. 1999. 41 p.
19. Marker T.R., Speitel L.C. Evaluating the Decomposition Products Generated Inside an Intact Fuselage During a Simulated Postcrash Fuel Fire: Report DOT/FAA/AR-09/58. U.S. Department of Transportation FAA, 2011. 86 p.
20. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Построение математической модели и расчет температур образцов при испытаниях на огнестойкость // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №7 (55). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-12-12.
21. Барботько С.Л., Вольный О.С., Вешкин Е.А., Гончаров В.А. Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // Авиационная промышленность. 2018. №2. С. 63–67.
22. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 424 с.
23. Rehn S. Vertical Bunsen Burner Testing of 3D-Printed Material // International Aircraft Materials Fire Test Forum Meeting (Cologne, Germany. June 18, 2019). URL: <http://www.fire.tc.faa.gov> (дата обращения: 13.09.2019).
24. Green M. CHM014M – Flame Retardant Chemicals: Technologies and Global Markets. BCC Research, 2015. 164 p.
25. Polymer Green Flame Retardants / ed. C.D. Papaspyrides, P. Kiliaris. Elsevier, 2014. 943 p.
26. Lyon R.E., Gandhi S., Crowley S. Fire Properties of Heat-Resistant Polymers: Report DOT/FAA/TC-TN18/32. U.S. Department of Transportation FAA, 2019. 33 p.
27. Барботько С.Л., Вольный О.С., Постнов В.И., Шуркова Е.Н. Исследование влияния структуры армирования на характеристики пожарной опасности стеклопластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №4 (76). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-108-120.
28. 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.
29. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // Эксперт. 2015. №15 (941). С. 49–53.
30. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
31. Платонов А.А., Душин М.И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.
32. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаздат, 2015. 290 с.
33. Horner A. Aircraft Materials Fire Test Handbook: Report DOT/FAA/AR-00/12. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2012. 235 p.
34. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. CS-25. Amendment 15. July 21, 2014. 921 p.
35. Federal Regulations. Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes. URL: <http://www.ecfr.gov> (дата обращения: 21.06.2019).