

Научная статья

УДК 699.81:678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150

ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ (обзор)

А.В. Начаркина¹, И.В. Зеленина¹, М.И. Валуева¹, С.Л. Барботько¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований параметров пожаробезопасности высокотемпературных углепластиков, изготовленных на основе различных термостойких полимерных связующих, проведенных с целью определения возможности их потенциального применения в конструкциях изделий авиационной техники, с точки зрения соответствия требованиям регламентирующих документов в области авиационной пожаробезопасности. Показано, что рассмотренные углепластики обладают высокими значениями характеристик пожарной безопасности и могут использоваться в изделиях авиационной техники.

Ключевые слова: пожаробезопасность, полимерные композиционные материалы, углепластики, высокотемпературные углепластики, авиационная техника

Для цитирования: Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.

Scientific article

FIRE SAFETY OF HIGH-TEMPERATURE CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS FOR AVIATION PURPOSES (review)

A.V. Nacharkina¹, I.V. Zelenina¹, M.I. Valueva¹, S.L. Barbotko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Presents the results of studies of the fire safety parameters of high-temperature carbon fiber reinforced plastics made on the basis of various heat-resistant polymer binders, conducted in order to determine the possibility of their potential application in the designs of aircraft products, from the point of view of compliance with the requirements of regulatory documents in the field of aviation fire safety. It is shown that the considered carbon plastics have high values of fire safety characteristics and can be used in aircraft products.

Keywords: fire safety, polymer composite materials, carbon fiber reinforced plastics (CFRP), high-temperature CFRP, aircraft products

For citation: Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Barbotko S.L. Fire safety of high-temperature carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.

Введение

Как известно, к свойствам материалов авиакосмического назначения предъявляются самые жесткие требования. К числу важных критериев эксплуатационных свойств относится их пожаробезопасность.

Характеристики пожаробезопасности в иностранных источниках обозначаются аббревиатурой FST, представляющей собой сокращение от слов «fire», «smoke» и «toxicity», которые в переводе с английского языка означают «огонь», «дым» и «токсичность» [1, 2]. Соответственно, в процессе испытаний материалов проводится определение их горючести (воспламеняемости), дымообразования и токсичности продуктов горения [3–5]. Однако термин «пожаробезопасность» в более широком смысле включает определение не только горючести, дымообразования и токсичности при горении, но и огнестойкость (как метод испытаний по определению стойкости к сохранению работоспособности в условиях воздействия пламени), тепловыделение, кислородный индекс и ряд других характеристик [6–11].

Изначально требования по пожарной безопасности к материалам авиационного назначения введены в действие с середины XX в., но постоянно претерпевают изменения и дополняются. В последние 5 лет разработаны и планируются к введению новые требования по пожарной безопасности, в том числе для внешнего контура самолета, которые ранее не были включены в перечень требований [12, 13].

В настоящее время степень пожаробезопасности воздушных судов все сильнее зависит от возрастающей доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) [14–19], применяемых в их конструкции, так как большинство полимерных материалов, в отличие от традиционных металлических, являются горючими [20]. Поэтому вопрос разработки ПКМ с высокими характеристиками пожаробезопасности и способов их повышения у существующих материалов остается актуальным. Разрабатываются огнезащитные покрытия различного химического состава, материалы с добавлением антипиренов (химических веществ, которые препятствуют процессу горения), а также модифицированные полимеры с измененным составом и структурой [21–24]. Но любые добавки, вводимые в полимерное связующее, могут повлиять не только на характеристики пожаробезопасности, но и на другие свойства материала на его основе – как правило, в негативную сторону, в первую очередь на механические свойства ПКМ.

Пожаробезопасность полимерных материалов непосредственно связана с их устойчивостью к термоокислительной деструкции [25]. Однако прогнозирование характеристик пожаробезопасности новых материалов в зависимости от термо- и теплостойкости, а также от термоокислительной устойчивости полимера – довольно сложная задача, так как на процесс горения, кроме природы полимера, влияют и другие факторы [26, 27]. Эти факторы относятся к внешним условиям возникновения пламени и процесса горения – например, таким как: состав газовой среды, мощность воздействующего пламени, наличие рядом дополнительных легковоспламеняющихся материалов, форма и положение образца материала относительно пламени. Поэтому для определения степени пожаробезопасности материала и его классификации необходимо проводить многофакторный анализ поведения материала при испытаниях в различных условиях.

Полимерные композиционные материалы на основе высокотемпературных полимерных матриц обладают повышенной термо- и теплостойкостью, что обеспечивает более высокие характеристики пожаробезопасности [28]. Данные материалы также имеют высокий показатель кислородного индекса, что свидетельствует о перспективности применения высокотемпературных ПКМ не только в авиационной отрасли, но и для космических летательных аппаратов, где данный параметр является основным.

Прогнозируется, что мировой рынок высокотемпературных полимерных связующих будет расти в среднем на 9,4 % в течение периода с 2023 по 2028 г., а главное направление их применения – авиационная отрасль. Так, самолет F-35 фирмы Lockheed Martin является одним из самых продаваемых самолетов 5-го поколения, в котором используются высокотемпературные ПКМ. В настоящее время ~35 % рынка самолетов изготовлено с применением композиционных материалов, из них ~50 % – с высокотемпературными полимерами [29].

В последние годы высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих становятся все более востребованными на мировом рынке и широко используются в двигателях самолетов, а также в планерах, гондолах двигателей и воздуховодах для горячего воздуха. На лидирующей позиции находятся высокотемпературные углепластики на основе полиимидных связующих с рабочими температурами 280–350 °С [30]. Особое место в ряду термостойких ПКМ занимают материалы на основе фталонитрильных связующих, которые обладают высокими упруго-прочностными характеристиками в сочетании с повышенной огне- и термостойкостью [31, 32]. Композиты на основе фталонитрильных связующих удовлетворяют по пожаробезопасности высоким требованиям военного стандарта флота MIL-STD-2031 для подводных лодок и используются в их конструкции [33]. Следует отметить также и углепластики на основе бензоксазиновых связующих, у которых уровень прочностных свойств соответствует уровню свойств углепластиков на основе распространенных эпоксидных связующих, при этом они имеют рабочую температуру 200 °С и высокий уровень пожаробезопасности. Сохранение относительно невысокой температуры переработки материала и наличие свойств, характерных для термостойких связующих, делает углепластики на основе бензоксазиновых связующих перспективными материалами, которые находят применение в первую очередь для внутренней отделки салона самолета [34–36].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) проводятся разработка высокотемпературных ПКМ и обширный комплекс испытаний, в том числе включающий испытания на пожаробезопасность [8, 37].

В данной работе рассмотрены результаты исследований параметров пожаробезопасности высокотемпературных углепластиков, изготовленных на основе различных термостойких полимерных связующих, разработанных в ВИАМ, проведенных с целью определения возможности их потенциального применения в конструкциях изделий авиационной техники.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы (ПКМ)» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Оценка пожаробезопасности высокотемпературных углепластиков авиационного назначения

Для оценки пожаробезопасности (в общем смысле этого определения) используется более 40 различных стандартов. Такое большое количество нормативных документов связано с разным уровнем требований по пожаробезопасности, предъявляемых к материалам различных классов, используемых как в быту, так и во всех отраслях промышленности.

Наиболее жесткие требования предъявляются к материалам авиакосмического назначения по FST-свойствам. Даже при обеспечении высоких технологических, эксплуатационных и экономических показателей применение материалов в изделиях авиационной техники категорически невозможно в том случае, если они не соответствуют требованиям по горючести, дымообразованию (количество и плотность дыма при горении и тлении), токсичности продуктов горения и тления [4, 12].

Для исследования и оценки характеристик пожаробезопасности ПКМ, предназначенных для использования в изделиях авиационно-космической техники, в России существуют различные методы, которые изложены в нормах летной годности для различных типов самолетов: АП-ОЛС, АП-23, АП-25, АП-27, АП-29, АП-33 [6–11]. Рассматриваемые в данной статье углепластики предназначены для применения в самолетах транспортной категории, поэтому выбранные методы регламентируются нормами

АП-25 (табл. 1) [8]. Подробное описание методов и условий проведения испытаний образцов, определяемых параметров и обработки результатов приведены в перечисленных нормативных документах и тексте Авиационных правил (АП-25).

В табл. 1 приведен перечень нормативной документации для проведения комплекса испытаний углепластиков на пожаробезопасность.

Таблица 1

Нормативная документация для проведения комплекса испытаний углепластиков на пожаробезопасность

Характеристика	Нормативная документация	Оборудование	Размер образца, мм
Горючесть по АП-25, Приложение F, Часть I	ГОСТ Р 57924–2017, ОСТ1 90094–79	Камера горючести для испытания горелкой Бунзена	305×75×(1–6)
Дымообразование по АП-25, Приложение F, Часть V	ГОСТ 24632–81	Дымовая камера SD-1-С фирмы Govmark	75×75×(1–5)
Токсичность при горении (концентрация токсичных газов)	ММ 1.595-20-441–2012		
Кислородный индекс	ГОСТ 21793–76	Прибор для определения кислородного индекса FTT 100 OI	140×10×4
Огнестойкость и огнестойкость (методы определения соответствуют требованиям авиационных норм)	СТО 1-595-20-532–2017	Многорожковая газовая горелка	250×250×(1–2)
Тепловыделение по АП-25, Приложение F, Часть IV	ГОСТ Р 57928–2017	Проточный калориметр типа OSU	150×150×(1–4)

В табл. 2 приведен перечень рассматриваемых в данной работе высокотемпературных углепластиков, разработанных и исследованных в ВИАМ.

Таблица 2

Углепластики на основе высокотемпературных связующих

Углепластик	Состав углепластика		Рабочая температура, °С
	связующее	наполнитель	
<i>Полиимидное связующее</i>			
КМУ-2л, КМУ-2лп	СП-97	Лента углеродная ЛУ-2 или ЛУ-П	280
КМУ-2э	СП-97к	Лента углеродная Элур-П	
ВКУ-61	ВС-51	Ткань углеродная ВТкУ-2.200	До 320
<i>Фталонитрильное связующее</i>			
ВКУ-14	ИП-5	Лента УОЛ-300 из высокомодульного жгута ГЖ-20	До 400
ВКУ-38ЖН	ВСН-31	Высокомодульный жгут ЖГВ-430-12К или лента УТОВ-300-200 из высокомодульного жгута ЖГВ-430-12К	300–400
ВКУ-38ТР	ВСН-31	Ткань углеродная УТ-900И из волокна Т-800НВ-6к-40В	300
<i>Бисмалеинимидное связующее</i>			
КМУ-8	ПАИС-104	Лента углеродная Элур-П	250
БМИ-3/3692*	БМИ-3	Ткань углеродная Porcher (артикул 3692)	250 (кратковременно)
<i>Бензоксазиновое связующее</i>			
Экспериментальный материал**	б-10-12	Ткань углеродная ВТкУ-2.200	200
<i>Полициануратное связующее</i>			
ВКУ-42	ВСТ-32	Ткань углеродная Porcher (артикул 4750)	200

* Разработка АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина».

** Далее по тексту – ВТкУ-2.200/б-10-12.

Оценка горючести

Горение ПКМ (в частности, углепластиков) является сложным процессом, характер и интенсивность которого зависят от химической природы и строения композита [20]. Поскольку углеродные волокна не способны поддерживать процесс горения и имеют температуру возгорания $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, то фактором, определяющим горючесть углепластиков, служат полимерные связующие, являющиеся органическими материалами, которые при повышенных температурах ($\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) воспламеняются и горят [38, 39].

В работе [26] определены основные критерии горючести ПКМ, которые приведены на рис. 1.

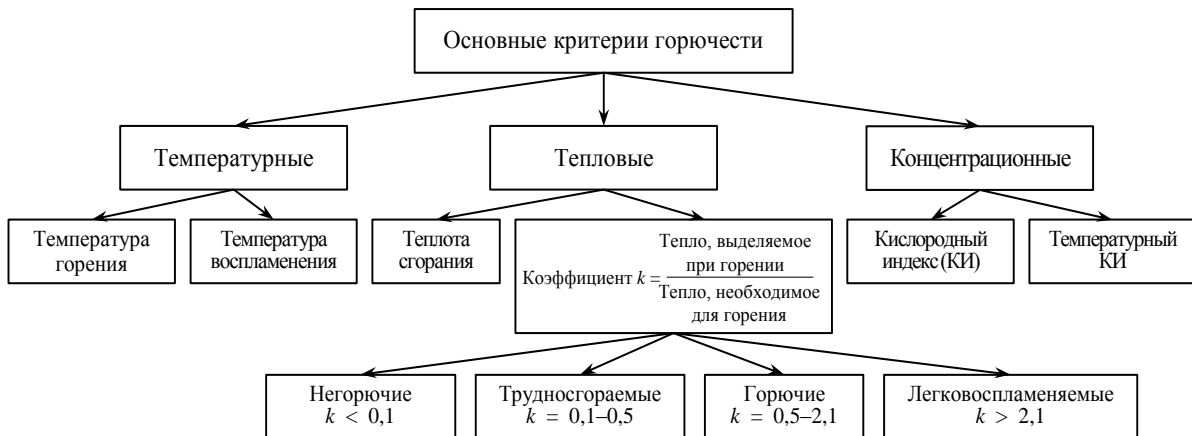


Рис. 1. Критерии горючести полимерных композиционных материалов

Согласно установленным современным нормативным требованиям АП-25, п. 25.853(а), к использованию в изделиях авиационной техники допускаются только самозатухающие материалы. Способность веществ и материалов к самозатуханию (горючесть) определяют по предельно допустимым значениям таких показателей, как продолжительность остаточного горения (тления), длина обугливания и продолжительность горения каплей при испытаниях образцов в вертикальном положении. Метод испытаний на горючесть (воспламеняемость) изложен в Авиационных правилах АП-25, Приложение F, Часть I, а также в ГОСТ 57924–2017 и ОСТ1 90094–79. В соответствии с требованиями авиационных норм, максимальная продолжительность остаточного (самостоятельного) горения образца после удаления источника воспламенения (пламени газовой горелки Бунзена) не должна превышать 15 с, а длина прогорания – быть не более 152 мм. Если образцы испытанного материала соответствуют этим требованиям и при этом продолжительность остаточного горения превышает 0 с, то материалу присваивается категория «самозатухающий», если продолжительность остаточного горения отсутствует (0 с), то материалу присваивается категория «трудногорающий». Если испытанные образцы не соответствуют требованиям по допустимой продолжительности остаточного горения или длине прогорания, то они относятся к категории «сгорающий».

В табл. 3 приведены данные по горючести рассматриваемых углепластиков, определяемые при максимальной продолжительности экспозиции в пламени горелки в течение 60 с на вертикально размещенных образцах.

Как видно из данных табл. 3, углепластики на основе высокотемпературных связующих относятся к категории трудногорающих (не наблюдается горения и тления сразу после удаления источника пламени) или самозатухающих (остаточное горение образца сразу после удаления источника пламени длится не более 15 с и длина обугливания составляет не более 152 мм). Наилучшие результаты показали углепластики

(независимо от толщины испытываемого образца) на основе фталонитрильных и полиимидных связующих (трудногорающие). Несколько хуже показатели горючести у углепластиков на основе бисмалеинимидного, бензоксазинового и полициануратного связующих, а в зависимости от толщины образца их можно отнести как к трудногорающим, так и к самозатухающим.

Таблица 3

Результаты испытания углепластиков на горючесть*

Углепластик	Толщина образца, мм	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм	Категория горючести
<i>Полиимидные связующие</i>				
КМУ-2лп	1,3	0	0	Трудногорающий
КМУ-2э	1,0	0	0	Трудногорающий
	2,0	0	0	
ВКУ-61	1,3	0	30	Трудногорающий
	2,3	0	11	
	3,4	0	1	
<i>Фталонитрильные связующие</i>				
ВКУ-14	1,0	0	46	Трудногорающий
ВКУ-38ЖН	1,3	0	0	
	2,4	0	0	Трудногорающий
	5,3	0	0	
ВКУ-38ТР	1,0	0	6	Трудногорающий
	2,2	0	1	
<i>Бисмалеинимидные связующие</i>				
КМУ-8	1,5	0	30	Трудногорающий
БМИ-3/3692	0,77	0	5	Трудногорающий
	1,8	4	19	Самозатухающий
<i>Бензоксазиновое связующее</i>				
ВТкУ-2.200/ б-10-12	1,3	0	52	Трудногорающий
	2,6	14	18	Самозатухающий
<i>Полициануратное связующее</i>				
ВКУ-42	1,99	6	31	Самозатухающий
Допустимые значения по АП-25, Приложение F, Часть I, п. 25.853(а)		Не более 15	Не более 152	–

* Для всех испытанных углепластиков горения капель не зафиксировано.

Оценка кислородного индекса

Показательной, но не обязательной для авиационной отрасли характеристикой является кислородный индекс (КИ), т. е. минимальная концентрация кислорода в кислородно-азотной смеси, при которой возможно самостоятельное горение материала в определенных условиях. Образец считают поддерживающим горение в данных концентрационных условиях, если после воспламенения и отвода горелки продолжается самостоятельное свечеобразное (т. е. сверху вниз) горение в течение не менее 300 с или длина сгоревшей части образца составляет не менее 50 мм. Зная данную характеристику, можно условно отнести материал к «сгорающему», если значение КИ <27 %, или к

«самозатухающему» – при КИ >27 %. Выбранная более высокая критическая концентрация (27 %), по сравнению с концентрацией кислорода в атмосферном воздухе (21 %), обусловлена более жесткими условиями горения образца (горение образца сверху вниз, а не снизу вверх, как при испытаниях на горючесть).

Как указывалось ранее, фактором, определяющим горючесть углепластиков, являются полимерные связующие, и чем больше кислородный индекс используемого связующего, тем более пожаробезопасным будет углепластик на его основе. На рис. 2 представлены кислородные индексы некоторых классов полимеров, используемых при изготовлении связующих для ПКМ [26].

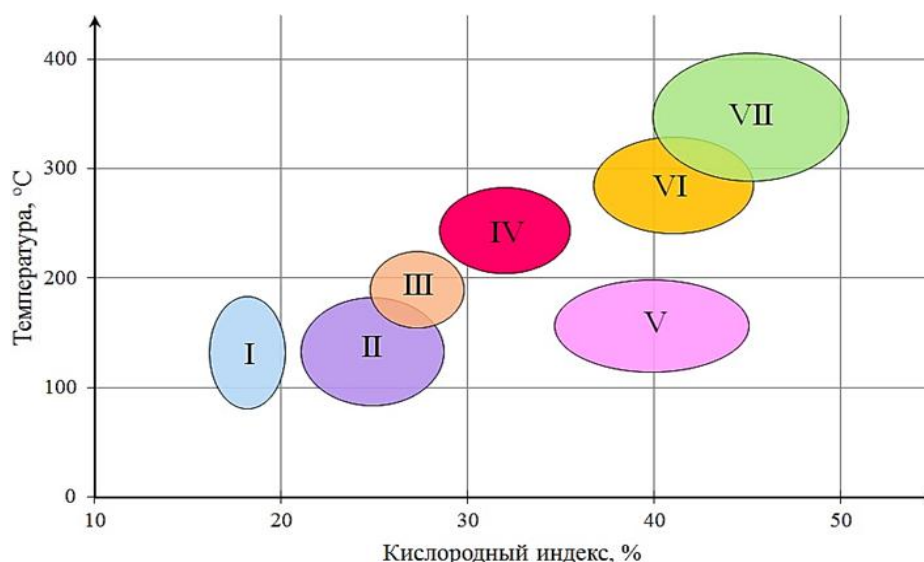


Рис. 2. Кислородный индекс различных классов полимеров: I – эпоксидные; II – эпоксидные (модифицированные); III – бензоксазиновые; IV – бисмалеинимидные; V – новолачные и резольные фенолформальдегидные смолы, VI – полиимидные; VII – фталонитрильные

Результаты определения КИ по ГОСТ 21793–76 показали, что углепластик марки ВКУ-61 на основе полиимидного связующего имеет самое высокое значение среди исследуемых материалов, которое составляет 76 %, а углепластик на основе бензоксазинового связующего 55 %.

Оценка дымообразования

В соответствии с требованиями авиационных норм, испытания по определению дымообразования проводятся согласно ГОСТ 24632–81.

Категория дымообразования материала определяется по значениям оптической плотности (D) дыма, выделяемого из образца, при воздействии внешнего теплового потока (режим испытания «пиролиз») или теплового потока и пламени пилотной горелки, инициирующей воспламенение образца (режим испытания «горение»). Все испытания проводятся при одном и том же тепловом потоке, равном 25 кВт/м². Согласно требованиям АП-25, п. 25.853(d), оптическая плотность дыма за первые 4 мин испытания (D₄) должна составлять не более 200. В ранее действующих нормах летной годности гражданских самолетов (НЛГС-3) [40] была предусмотрена классификация материалов на пять классов: практически не выделяющие дыма, слабодымящие, среднедымящие, существеннодымящие и сильнодымящие (табл. 4).

Результаты оценки дымообразования углепластиков приведены в табл. 5.

Таблица 4

**Классификация материалов по дымообразующей способности
согласно нормам НЛГС-3 (П. 7.5.5.4)**

Условный номер группы	Наименование группы	Показатели дымообразования		
		D ₂	D ₄	D _{max}
1	Практически не выделяющие дыма	–	–	Менее 5
2	Слабодымящие	–	Менее 16	от 5 до 50
3	Среднедымящие	–	от 16 до 100	от 50 до 200
4	Существеннодымящие	Менее 100	от 100 до 200	—
5	Сильнодымящие	Более 100	Более 200	—

Примечания.
1. Материалы, относящиеся к группам 2 и 3, должны одновременно удовлетворять требованиям по характеристикам D₄ и D_{max}.
2. Материалы, относящиеся к группе 4, должны одновременно удовлетворять требованиям по характеристикам D₂ и D₄. В случае несоответствия требованиям хотя бы по одной из характеристик, материал относится к группе 5.

Таблица 5

Результаты испытания углепластиков на дымообразование

Угле-пластик	Толщина образца, мм	Режим испытания	Показатели дымообразования			Категория дымообразования (группа)
			удельная оптическая плотность дыма		максимальная удельная оптическая плотность дыма D _{max}	
			D ₂	D ₄		
<i>Полиимидные связующие</i>						
КМУ-2э	1,0	Горение	0	0	5	Практически не выделяющий дыма (1)
		Пиролиз	0	0	1	
	2,0	Горение	0	0	2	
		Пиролиз	0	0	1	
	5,0	Горение	0	0	1	
		Пиролиз	0	0	1	
ВКУ-61	1,3	Горение	0,3	3	10	Слабодымящий (2)
		Пиролиз	0	0,3	1	
	2,3	Горение	0,3	1	1	Практически не выделяющий дыма (1)
		Пиролиз	0	0,3	2	
	3,4	Горение	0	0	4	
		Пиролиз	0	0	1	
<i>Фталонитрильные связующие</i>						
ВКУ-14	1,0	Горение	0	1	2	Практически не выделяющий дыма (1)
		Пиролиз	1	1	1	
ВКУ-38ЖН	1,3	Горение	1	2	7	Слабодымящий (2)
		Пиролиз	1	2	7	
	2,4	Горение	1	3	8	
		Пиролиз	1	1	6	
	5,3	Горение	1	1	5	
		Пиролиз	1	1	5	
ВКУ-38ТР	0,9	Горение	1	6	26	Слабодымящий (2)
		Пиролиз	0	2	15	
	2,1	Горение	0	9	8	Среднедымящий (3)
		Пиролиз	0	3	32	
<i>Бисмалеинимидные связующие</i>						
КМУ-8	1,5	Горение	20	–	83	Среднедымящий (3)
		Пиролиз	1	–	54	
БМИ-3/3692	0,77	Горение	31	45	47	Среднедымящий (3)
		Пиролиз	1	8	28	
	1,8	Горение	3	42	69	
		Пиролиз	0	1	48	
<i>Бензоксазиновое связующее</i>						
ВТКУ-2.200/b-10-12	1,3	Горение	93	106	107	Существеннодымящий (4)
		Пиролиз	7	41	118	
	2,6	Горение	34	172	206	
		Пиролиз	2	16	228	
<i>Полициануратное связующее</i>						
ВКУ-42	1,91	Горение	24	103	136	Существеннодымящий (4)
		Пиролиз	1	28	153	

По результатам испытаний на дымообразование установлено, что углепластики на основе полиимидных связующих образуют незначительное количество дыма и относятся к наивысшей категории (1). Углепластики следующей группы – на основе фталонитрильных связующих – показали не такие однозначные результаты. Углепластик ВКУ-14 соответствует уровню полиимидных связующих, в то время как углепластики на основе фталонитрильного связующего ВСН-31 (ВКУ-38ЖН, ВКУ-38ТР) относятся уже к категории слабодымящих. В случае углепластика ВКУ-38ТР, при изменении толщины увеличение плотности дыма незначительно и может быть связано с содержанием связующего в углепластике (разброс значений может составлять от 31 до 39 %). В то же время значения максимальной плотности дыма углепластика на основе бензоксазинового связующего при увеличении толщины возрастают в 2 раза и переводят материал из категории среднедымящих в существеннодымящие. Этот материал остается соответствующим требованиям авиационных норм – оптическая плотность дыма за первые 4 мин испытания не более 200, но существенно превышает значения для других материалов, что может несколько ограничивать применение данного углепластика во внутренней части обитаемых отсеков авиационной техники.

Оценка токсичности при горении

Одной из важных характеристик пожаробезопасности, оказывающей непосредственное влияние на выживаемость людей, находящихся в непосредственной близости от очага пожара, является токсичность образующихся при пиролизе и горении продуктов. В первом приближении токсичность материала связана с его способностью к дымообразованию, поэтому зная уровень оптической плотности дыма, можно оценочно спрогнозировать уровень токсичности. В связи с этим в настоящее время в государственных (федеральных) авиационных нормах (как отечественных, так и зарубежных) требования по токсичности продуктов горения отсутствуют. Однако поскольку токсичность имеет важное значение для выживаемости, эта характеристика нормируется в других отраслях промышленности, а также в качестве определяемой дополнительно некоторыми авиационно-строительными корпорациями – например, Boeing, Airbus, Bombardier.

Токсичность продуктов горения может определяться различными методами, наиболее распространенные – по смертности лабораторных животных, помещаемых в затравочную камеру, и по газовому анализу дымовых газов. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Для снижения трудоемкости и повышения воспроизводимости результатов, а также по принципу осуществления максимальной гуманности, в настоящее время за рубежом наиболее широко используется метод газового анализа. Поскольку в продуктах горения/пиролиза полимерных материалов может присутствовать до 1000 различных химических соединений (что контролировать практически невозможно), то было принято решение о проведении измерений только некоторых, наиболее значимых газов (табл. 6) [20].

Таблица 6

Предельно допустимые концентрации и определяемые виды газов в продуктах горения авиационных материалов

Корпорация	Предельно допустимая концентрация газов, ppm							
	CO ₂	CO	HF	HCl	HBr	SO ₂ (SO ₂ + H ₂ S)	HCN	NO _x (NO + NO ₂)
Boeing (BSS 7239)	–	3 500	200	500	–	100	150	100
Airbus (ABD 0031, AITM 3.0005)	–	1 000	100	150	–	100	150	100
Bombardier (SMP 800C)	90 000	3 500	100	500	100	100	100	100

Концентрацию газов измеряют в дымовой камере одновременно с измерением оптической плотности дыма при проведении испытаний на тех же образцах.

Результаты испытания высокотемпературных углепластиков представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты испытания углепластиков на токсичность при горении

Углепластик	Толщина, мм	Режим испытания	Предельно допустимая концентрация газов, ppm				
			CO ₂	CO	O ₂	NO _x	HCN
ВКУ-38ЖН	2,4	Горение	6000	130	–	12,1	0
		Пиролиз	300	12	–	1	0
	5,3	Горение	5000	130	–	20	0
		Пиролиз	3000	10	–	1	0
ВКУ-38ТР	2,1	Горение	5000	100	160000	80	–
		Пиролиз	1000	10	190000	10	–
ВКУ-61	3,4	Горение	5000	200	–	15	0,5
		Пиролиз	1000	12	–	1	0
ВТкУ-2.200/ b-10-12	2,5	Горение	5000	560	170000	100	3
		Пиролиз	1000	200	170000	1	2

Оценка токсичности углепластиков при горении является дополнительной характеристикой, которая не регулируется АП-25, но прописана в нормативных документах иностранных авиационных компаний и общих требованиях международного стандарта ISO 13344:2015 [41]. Ориентируясь на значения предельно допустимых концентраций токсичных веществ, установленных ведущими авиастроительными компаниями, можно сделать вывод, что независимо от типа высокотемпературного связующего значения концентрации определяемых газов очень малы и составляют в основном <10 % от предельно допустимого значения, кроме концентрации оксидов азота. Как раз по этому показателю можно увидеть отличия представленных типов связующих. Концентрация оксидов азота увеличивается в ряду: фталонитрил, полиимид, бензоксазин, и у последнего составляет 100 ppm (пороговое допустимое значение для авиационного материала).

Оценка тепловыделения

Еще одной характеристикой пожарной опасности, описывающей скорость развития очага пожара, является тепловыделение при горении. Для определения этой характеристики в авиационной отрасли используется проточный калориметр типа OSU, работающий по термометрическому методу.

Испытания по определению тепловыделения материалов при внешнем тепловом воздействии проводятся только по АП-25, Приложение F, Часть IV, по которым определяемыми характеристиками являются максимальная интенсивность выделения тепла и общее количество тепла, выделившегося за первые 2 мин испытания. Испытания проводят на панелях материала размером 150×150 мм, на которые воздействуют пламенем горелки и дополнительным тепловым потоком, равным 35 кВт/м², и по изменению температуры отходящих дымовых газов рассчитывают интенсивность тепловыделения в каждый конкретный момент времени.

Величина тепловыделения определяет максимальное время, в течение которого возможна выживаемость в условиях пожара, поэтому, так же как дымообразование и токсичность, при горении является критичной для материалов внутренней обшивки

самолета. Согласно требованиям авиационных норм, допустимое значение общего количества выделившегося тепла за первые 2 мин не должно превышать $65 \text{ (кВт}\cdot\text{мин)/м}^2$, а максимальная интенсивность выделения тепла за все время испытания не должна превышать 65 кВт/м^2 .

Испытания углепластика ВКУ-61 на основе полиимидного связующего показали значения более чем в 2 раза меньше допустимого (табл. 8). В свою очередь, углепластик ВКУ-38ЖН на основе фталонитрильного связующего превзошел все ожидания, так как за первые 2 мин испытания превалируют эндотермические процессы прогрева и термодеструкции, а не экзотермическая реакция горения.

Таблица 8

Результаты испытания углепластиков на тепловыделение

Углепластик	Толщина, мм	Максимальная интенсивность выделения тепла (пик), кВт/м ²	Время достижения максимума, с	Общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, (кВт·мин)/м ²
ВКУ-38ЖН	1,0	30	125	5
	2,0	14	225	-4
	4,0	6	295	-5
ВКУ-61	1,2	38	81	34
	2,3	38	200	12
	3,5	16	285	0

Оценка огнестойкости и огнестойкости

Для пожароопасных зон (области с высокими температурами и/или с наличием топлива, масел, гидрожидкостей) требуется выполнение условий по сохранению работоспособности и отсутствию проникновения открытого пламени в другие зоны в условиях пожара. Эти условия характеризуются терминами «огнестойкость» и «огнестойкость». Огнестойкость – сохранение работоспособности материала/конструкции в условиях стандартных испытаний при воздействии пламени с температурой $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 мин. Огнестойкость – сохранение целостности и отсутствие сквозного проникновения пламени в стандартных условиях испытаний при воздействии пламени с температурой $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 мин.

Определение огнестойкости и огнестойкости, проведенное в лабораторных условиях по СТО 1-595-20-532–2017 (метод Б) с использованием многорожковой газовой горелки, показало, что после 5 и 15 мин воздействия температуры $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в образцах углепластика ВКУ-61 толщиной 1,1–1,2 мм сквозное прогорание отсутствует, что позволяет классифицировать материал как огнестойкий и огнестойкий.

В то же время существует другой (менее распространенный) ранее применявшийся, но в настоящее время устаревший метод испытания – метод определения поведения пластмасс при контакте с раскаленным стержнем (ГОСТ 10456–69). При испытаниях по данному методу углепластика КМУ-2л показано, что при температуре стержня $1020 \text{ }^\circ\text{C}$ материал не горит, а при $1240 \text{ }^\circ\text{C}$ – только начинает слабо дымить.

Используемые методы определения не описаны в АП-25 и при их проведении следует руководствоваться требованиями, описанными в документе [42].

На рис. 3 в виде лепестковой диаграммы представлено сравнение исследованных высокотемпературных углепластиков по характеристикам пожаробезопасности между собой и с углепластиковыми на стандартных эпоксидных связующих (данные по ПКМ на основе эпоксидных связующих взяты из работ [3, 26]). Наилучшее значение каждой из характеристик пожаробезопасности условно принято за 100 %, а наихудшие показатели стремятся к нулю.

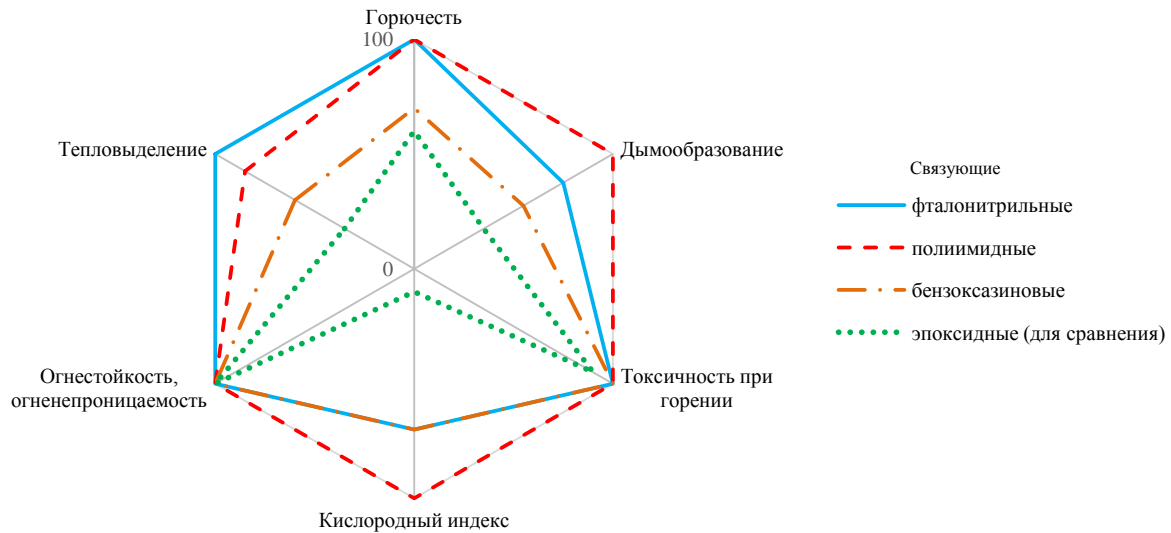


Рис. 3. Сравнение высокотемпературных углепластиков по характеристикам пожарной безопасности

Таким образом, проведенный анализ характеристик горючести, дымообразования, токсичности при горении, тепловыделения, огнестойкости углепластиков на основе высокотемпературных связующих (полиимидных, фталонитрильных, бисмалеинимидных, полициануратного и бензоксазинового) показал хорошую пожаробезопасность этих материалов.

Заключения

Рассмотренные в данной работе углепластики на основе высокотемпературных связующих относятся к категории трудносгорающих или самозатухающих и имеют высокий кислородный индекс.

Токсичность при горении представленных высокотемпературных углепластиков в целом незначительна, что свидетельствует о том, что данные материалы пригодны для применения в обитаемых частях различных конструкций и при возникновении пожара не увеличат риск отравления выделяющимися веществами.

По характеристикам огнестойкости и огнепроницаемости все углепластики (независимо от рабочей температуры) не допускают образования прогара и проникания огня сквозь образец.

Углепластики на основе высокотемпературных связующих – полиимидных, фталонитрильных, бисмалеинимидных, полициануратного и бензоксазинового – обладают высокими значениями характеристик пожарной безопасности и могут использоваться в изделиях авиационной техники.

Благодарности

Авторы выражают благодарность О.С. Вольному, проведшему большой объем испытаний по определению характеристик пожарной безопасности.

Список источников

1. Transport category airplanes: 14 CFR Part 25 – Airworthiness standards / Federal Aviation Administration. URL: http://www.faa.gov/regulations_policies/faa_regulations (дата обращения: 07.02.2022).
2. Certification Specifications for Large Aeroplanes – CS-25. European Aviation Safety Agency, 2003. 473 p.

3. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
4. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Springer, 2006. 398 p.
5. Бычихина Л.В., Воробьев В.Н., Грошев Ю.М., Монастырская Е.В. Методы исследования горючести и пожаробезопасности полимерных материалов // Методы испытаний и исследование полимерных материалов для авиастроения. М.: ОНТИ ВИАМ, 1977. С. 11.
6. Нормы летной годности очень легких самолетов: АП-ОЛС: утв. Постановлением 25-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 12.05.2006. СПб.: СЗ РЦАИ, 2006. 100 с.
7. Нормы летной годности гражданских легких самолетов: АП-23: утв. Постановлением 38-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 16.12.2021. 4-е изд. с поправками 1–6. СПб.: СЗ РЦАИ, 2021. 216 с.
8. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 37-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 27.04.2020. 6-е изд. с поправками 1–9. СПб.: СЗ РЦАИ, 2020. 328 с.
9. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории: АП-27: утв. Постановлением 37-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 27.04.2020. 3-е изд. с поправками 1, 2. СПб.: СЗ РЦАИ, 2020. 129 с.
10. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории: АП-29: утв. Постановлением 37-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 27.04.2020. 4-е изд. с поправками 1–4. СПб.: СЗ РЦАИ, 2020. 186 с.
11. Нормы летной годности двигателей воздушных судов: АП-33: утв. Постановлением 36-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 15.03.2018. 4-е изд. с поправками 1–3. СПб.: СЗ РЦАИ, 2020. 81 с.
12. Fire Safety Aspects of Polymeric Material. Vol. 6. Aircraft: Civil and Military. Washington D.C.: Publication NMAV 318-6, National Materials Advisory Board, 1977. 268 p.
13. Барботько С.Л., Вольный О.С., Боченков М.М. Анализ предложений Федеральной авиационной администрации США по реформированию авиационных норм в части, касающейся пожарной безопасности применяемых материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-101-117.
14. 1/4 Scale fire penetration testing of composite fuselage // Sixth triennial international fire & cabin safety research conference. Atlantic City, 2010. 22 p.
15. Lyon R.E. Nongalogen fire-resistant plastics for aircraft interiors: technical report. DOT/FAA/AR-TN08/5. Springfield, Virginia: U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2008. 33p.
16. Sohel R., Fanguiero R. Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications. Woodhead Publishing; Elsevier, 2016. 474 p.
17. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
18. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
19. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.04.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
20. 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.

21. Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30.
22. Flame Retardant Chemicals: Technologies and Global Markets. BCC Research, 2018. 128 p.
23. Барботько С.Л., Боченков М.М., Вольный О.С., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Оценка эффективности антипиренов, перспективных для создания новых полимерных композиционных материалов, предназначенных для авиационной техники // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-20-29.
24. Буравов Б.А., Бочкарев Е.С., Аль-Хамзави А. и др. Современные тенденции в разработке антипиренов для полимерных композиций. Состав, свойства, применение // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 12 (247). С. 7–24.
25. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Химия, 1981. 280 с.
26. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
27. Берлин А.А. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 57–63.
28. Mittal K.L. Polyimides and Other High Temperature Polymers: Synthesis, Characterization and Applications. Utrecht: VSP, 2005. 570 p.
29. Global Forecast for High Temperature Composite Resin (2023–2028 Outlook) – High Tech & Emerging Markets Report // MarketResearch [офиц. сайт]. URL: <https://www.marketresearch.com/Barnes-Reports-v2737/Global-Forecast-High-Temperature-Composite-30844419/> (дата обращения: 10.02.2022).
30. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Хасков М.А. Высокотемпературные углепластики на основе терморезистивного полиимидного связующего // Вопросы материаловедения. 2020. № 3 (103). С. 89–102.
31. Sastri S.B., Armistead J.P., Keller T.M. Flame resistant phthalonitrile composites. Washington: Naval Research Lab., International Aircraft fire and cabin safety research conference, 1998. 12 p. URL: <http://www.semanticscholar.org/paper/FLAME-RESISTANT-PHTALONITRILE-COMPOSITES-Sastri-Armistead/70a8302ea6967bb346122bcc16a8dd54ff17bd77> (дата обращения: 07.02.2022).
32. Раскутин А.Е. Термостойкие углепластики для конструкций авиационной техники, эксплуатирующихся при температурах до 400 °С: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 166 с.
33. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ. 2016. № 2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
34. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексашин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
35. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
36. Ishida H., Froimowicz P. Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology. Elsevier, 2017. 1126 p.
37. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
38. Chand S. Review Carbon fibers for composites // Journal of Materials Science. 2000. No. 35. P. 1303–1313.

39. Constantin L., Fan L., Pouey M. et al. Spontaneous formation of multilayer refractory carbide coatings in a molten salt media // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2021. No. 118 (18). URL: <https://www.researchgate.net/publication/351245744> (дата обращения: 07.02.2022).
40. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. Изд. 3-е. М.: ЦАГИ, 1984. 464 с.
41. ISO 13344:2015. Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents. International Organization for Standardization, 2015. 20 p.
42. Методы определения соответствия Федеральных авиационных правил «Экземпляр воздушного судна. Требования и процедура сертификации»: утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации № 132 16.05.2003. М., 2004. 53 с.

References

1. Transport category airplanes: 14 CFR Part 25 – Airworthiness standards. Available at: http://www.faa.gov/regulations_policies/faa_regulations (accessed: February 07, 2022).
2. *Certification Specifications for Large Aeroplanes – CS-25*. European Aviation Safety Agency, 2003, 473 p.
3. Mikhailin Yu.A. Heat-resistant polymers and polymeric materials. St. Petersburg: Professiya, 2006, 624 p.
4. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire Properties of Polymer Composite Materials*. Springer, 2006, 398 p.
5. Bychikhina L.V., Vorobyov V.N., Groshev Yu.M., Monastyrskaya E.V. Methods for studying the combustibility and fire safety of polymeric materials. *Methods of testing and research of polymeric materials for aircraft construction*. Moscow: VIAM, 1977, pp. 11.
6. *Airworthiness standards for very light aircraft: AP-OLS*: approved by Resolution of the 25th session of the Council on Aviation and the Use of Airspace 05/12/2006. St. Petersburg: SZ RCAI, 2006, 100 p.
7. *Airworthiness standards for civil light aircraft: AP-23*: approved by Decree of the 38th session of the Council on Aviation and the Use of Airspace on December 16, 2021. 4th ed. St. Petersburg: SZ RCAI, 2021, 216 p.
8. *Airworthiness standards for transport category aircraft: AP-25*: approved by Resolution of the 37th session of the Council on Aviation and the Use of Airspace on April 27, 2020. 6th ed. St. Petersburg: SZ RCAI, 2020, 328 p.
9. *Airworthiness standards for rotorcraft of normal category: AP-27*: approved by Resolution of the 37th session of the Council on Aviation and the Use of Airspace on April 27, 2020. 3rd ed. St. Petersburg: SZ RCAI, 2020, 129 p.
10. *Airworthiness standards for transport category rotorcraft: AP-29*: approved by Resolution of the 37th session of the Council on Aviation and the Use of Airspace on April 27, 2020. 4th ed. St. Petersburg: SZ RCAI, 2020, 186 p.
11. *Airworthiness standards for aircraft engines: AP-33*: approved by Resolution of the 36th session of the Council on Aviation and the Use of Airspace on March 15, 2018. 4th ed. with amendments 1–3. St. Petersburg: SZ RCAI, 2020, 81 p.
12. *Fire Safety Aspects of Polymeric Material. Vol. 6. Aircraft: Civil and Military*. Washington D.C.: Publication NMAB 318-6, National Materials Advisory Board, 1977, 268 p.
13. Barbotko S.L., Volny O.S., Bochenkov M.M. Analysis of the US Federal Aviation Administration proposals for the reform of aviation standards regarding the fire safety of used materials (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 7, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-101-117.
14. 1/4 Scale fire penetration testing of composite fuselage. *Sixth triennial international fire & cabin safety research conference*. Atlantic City, 2010. 22 p.
15. Lyon R.E. *Nongalogen fire-resistant plastics for aircraft interiors: technical report*. DOT/FAA/AR-TN08/5. Springfield, Virginia: U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2008, 33p.

16. Sohel R., Fangueiro R. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing; Elsevier, 2016, 474 p.
17. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
18. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Grigoreva K.N. Research of the influence of the modifying additives nature on the rheological and thermomechanical properties of a photopolymer composition based on epoxy vinyl ester resin. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
19. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
20. Barbotko S.L., Volny O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N. Evaluation of the fire safety of polymeric materials for aviation purposes: state analysis, test methods, development prospects, methodological features. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 424 p.
21. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A. Methods and means of ensuring the required indicators of fire safety of structures made of polymer composites (review). *Pozharovzryvobezopasnost*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 9–30.
22. *Flame Retardant Chemicals: Technologies and Global Markets*. BCC Research, 2018, 128 p.
23. Barbotko S.L., Volny O.S., Bochenkov M.M. Analysis of the US Federal Aviation Administration proposals for the reform of aviation standards regarding the fire safety of used materials (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 7, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-101-117.
24. Buravov B.A., Bochkarev E.S., Al-Khamzawi A. et al. Current trends in the development of flame retardants for polymer compositions. Composition, properties, application. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 2020, no. 12 (247), pp. 7–24.
25. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Combustion of polymeric materials*. Moscow: Khimiya, 1981. 280 p.
26. Mikhailin Yu.A. *Heat, thermal and fire resistance of polymeric materials*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2011, 416 p.
27. Berlin A.A. Combustion of polymers and low flammability polymeric materials. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1996, no. 9, pp. 57–63.
28. Mittal K.L. *Polyimides and Other High Temperature Polymers: Synthesis, Characterization and Applications*. Utrecht: VSP, 2005, 570 p.
29. Global Forecast for High Temperature Composite Resin (2023–2028 Outlook) – High Tech & Emerging Markets Report. Available at: <https://www.marketresearch.com/Barnes-Reports-v2737/Global-Forecast-High-Temperature-Composite-30844419/> (accessed: February 10, 2022).
30. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Khaskov M.A. High-temperature carbon plastics based on thermosetting polyimide binder. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 3 (103), pp. 89–102.
31. Sastri S.B., Armistead J.P., Keller T.M. *Flame resistant phthalonitrile composites*. Washington, DC: Naval Research Lab., International Aircraft fire and cabin safety research conference, 1998, 12 p. Available at: <http://www.semanticscholar.org/paper/FLAME-RESISTANT-PHTALONITRILE-COMPOSITES-Sastri-Armistead/70a8302ea6967bb346122bcc16a8dd54ff17bd77> (дата обращения: 07.02.2022).
32. Raskutin A.E. Heat-resistant carbon plastics for aircraft structures operating at temperatures up to 400 °C: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2007, 166 p.
33. Zelenina I.V., Gulyayev I.N., Kucherovskiy A.I., Mukhametov R.R. Heat-resistant CFRP for the impulse wheel of the centrifugal compressor. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2 (38), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 7, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
34. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmelniitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 7, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.

35. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aero-space engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 7, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
36. Ishida H., Froimowicz P. *Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology*. Elsevier, 2017. 1126 p.
37. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
38. Chand S. Review Carbon fibers for composites. *Journal of Materials Science*, 2000, no. 35, pp. 1303–1313.
39. Constantin L., Fan L., Pouey M. et al. Spontaneous formation of multilayer refractory carbide coatings in a molten salt media. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, no. 118 (18). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/351245744> (accessed: February 07, 2022).
40. *Airworthiness standards for civil aircraft of the USSR*. Ed. 3rd. Moscow: TsAGI, 1984, 464 p.
41. *ISO 13344:2015. Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents*. International Organization for Standardization. 2015. 20 p.
42. *Methods for determining compliance with the Federal Aviation Rules “Instance of an aircraft. Requirements and certification procedure”*: approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 132 of May 16, 2003. Moscow, 2004, 53 p.

Информация об авторах

Начаркина Анастасия Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зеленина Ирина Викторовна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Валуева Мария Игоревна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Барботко Сергей Львович, начальник сектора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anastasia V. Nacharkina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Zelenina, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria I. Valueva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey L. Barbotko, Head of Sector, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.05.2022.
The article was submitted 04.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 20.05.2022.