

Научная статья

УДК 678.8:699.81

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-166-175

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ НАПОЛНИТЕЛЯ В ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКАХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ

С.Л. Барботько¹, М.М. Боченков¹, О.Н. Клименко¹

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

Аннотация. Исследовано влияние пространственной ориентации наполнителя в однонаправленных полимерных композиционных материалах на характеристики пожарной опасности – тепловыделения при горении. В качестве исследуемых материалов выбраны углепластики на основе углеродного жгута и однонаправленной углеродной ткани. Установлено, что в зависимости от ориентации образца в держателе при проведении испытания (направление волокон наполнителя [0°] (вертикальное) или [90°] (горизонтальное)) меняется максимальная интенсивность выделения тепла.

Ключевые слова: пожаробезопасность, тепловыделение при горении, полимерный композиционный материал, углепластик, однонаправленный материал, влияние схемы армирования

Для цитирования: Барботько С.Л., Боченков М.М., Клименко О.Н. Влияние пространственной ориентации наполнителя в однонаправленных углепластиках на характеристики тепловыделения при горении // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 166–175. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-166-175.

Scientific article

THE INFLUENCE OF SPATIAL ORIENTATION OF THE FILLER IN UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS ON THE HEAT RELEASE CHARACTERISTICS DURING COMBUSTION

S.L. Barbotko¹, M.M. Bochenkov¹, O.N. Klimenko¹

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

Abstract. This study examined the effect of filler spatial orientation in polymer composite materials on fire hazard characteristics – heat release during combustion. The materials studied were carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) based on carbon tow and unidirectional carbon fabric. It was found that depending on the orientation of the specimen in the test holder (vertical filler fiber direction – [0°] or horizontal – [90°]), the heat release characteristics change, with the maximum heat release rate changing.

Keywords: fire safety, heat release, polymer composite material, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), unidirectional material, influence of reinforcement pattern

For citation: Barbotko S.L., Bochenkov M.M., Klimenko O.N. The influence of spatial orientation of the filler in unidirectional carbon fiber reinforced plastics on the heat release characteristics during combustion. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 166–175. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-166-175.

Введение

По мере развития материаловедения постоянно возрастает применение полимерных материалов в различных отраслях промышленности. Максимальное увеличение объемов использования полимерных материалов для изготовления различных конструктивных элементов наблюдается в отраслях, где наиболее важно получить лучшие весовые характеристики, а именно – в авиационной промышленности и космонавтике [1, 2].

Однако полимерные материалы, по сравнению с широко используемыми конструкционными сплавами на основе железа, алюминия или титана, имеют значительно более высокую способность к воспламенению, т. е. являются более пожароопасными. В связи с этим одним из важнейших направлений развития полимерного материаловедения, наряду с получением более высоких физико-механических характеристик, является создание полимерных связующих, обеспечивающих улучшение пожарной безопасности полимерных композиционных материалов (ПКМ) и конструктивных элементов на их основе [3, 4].

При создании ПКМ с улучшенными характеристиками пожарной безопасности основное внимание уделяется показателям полимерного связующего (термостойкость, теплота сгорания, коксовое число, содержание связующего в ПКМ, режимы переработки) [5, 6]. Но при этом практически не учитываются состав и структура армирующего наполнителя, так как считается, что стеклянный или углеродный наполнитель в условиях пожара является инертным, не разрушается, не образует горючих газов и не воспламеняется. Например, в работе [7] показано, что влиянием типа переплетения на характеристики пожаробезопасности можно пренебречь при условии сохранения одной и той же поверхностной массы наполнителя (ткани стеклянные, углеродные или из термостойких органических волокон) и его химической природы.

Однако имеется ряд данных, подтверждающих, что инертный наполнитель, хотя напрямую не участвует в процессах горения, тем не менее может влиять на изменение пожарной безопасности ПКМ. Например, в работах [8, 9] показано, что наличие наполнителя (стеклоткань, стекловолокно) приводит к снижению термостойкости полимерной матрицы на 10–20 °С.

В работе [10] исследована устойчивость углеродных волокон к окислению. В работе [11] изучено влияние типа наполнителя (стеклянные или углеродные волокна) на характеристики горючести. Показано существенное изменение характеристик в зависимости как от типа, так и от структуры и поверхностной плотности наполнителя.

В работах [12–14] сначала расчетным путем установлено, а затем экспериментально доказано, что при одном и том же содержании связующего и толщине образца в зависимости от поверхностной плотности стеклонаполнителя существенно меняется кинетика прогрева, термодеструкции и последующего тепловыделения при горении стеклопластика.

При проведении испытаний на горючесть текстильных материалов (ткани, ковры) в соответствии с требованиями авиационных норм [15–18] обязательным условием является определение характеристик образцов, вырезанных вдоль как продольного (по основе), так и поперечного (по утку) направления. В настоящее время необходимость проведения испытаний ПКМ с различной схемой армирования в авиационных нормах, как и в действующих вспомогательных документах (Aircraft Materials Fire Test Handbook, Advisory Circular, Technical Standard Order, Methods of Compliance, Policy Statement) Федерального авиационного управления (FAA) США, не прописана. Не предусмотрено учитывать влияние структуры армирования ПКМ и в предложенных к введению FAA изменениях в авиационные нормы и рекомендательные циркуляры.

Фактически единственным зарубежным исключением является комплекс работ, посвященных исследованию влияния схемы изготовления аддитивных материалов на характеристики горючести [19–22]. В этих работах исследовано влияние изготовления

образцов вдоль различных осей (X , Y или Z), а также схемы (узора) заполнения, например линейная, сотовая, гексагональная, крестообразная с различными углами наклона. Показано существенное изменение как длины прогорания, так и продолжительности остаточного горения в зависимости от направления и структуры изготовления образца.

В отечественной работе [23] показано, что структура армирования (однаправленная, орто- или квазиизотропная) может оказывать влияние на характеристики пожарной опасности стеклопластика – изменяются характеристики горючести, дымообразования и тепловыделения при горении.

В работе [24] исследовано влияние структуры армирования углепластика (однаправленная или квазиизотропная) и расположения волокон ($[0^\circ]$ или $[90^\circ]$) при одном направленном армировании и доказано существенное изменение характеристик горючести как по продолжительности остаточного (самостоятельного) горения, так и по длине прогорания. В качестве объяснения влияния схемы армирования (вырезки образцов) на характеристики горючести углепластика с однонаправленной структурой армирования показано существенное изменение теплопроводности в продольном (вдоль жгутов основы), поперечном (вдоль утка) и перпендикулярном (трансверсальном) направлениях. Поскольку очаг пламени воздействует на середину нижней торцевой части поверхности образца, то в зависимости от схемы армирования ($[0^\circ]$ или $[90^\circ]$) существенно меняются кинетика его прогрева по длине и ширине и, как следствие, область термодеструкции, место и интенсивность выхода горючих продуктов, условия их воспламенения.

В отличие от испытаний на горючесть, при испытаниях на дымообразование или тепловыделение образец нагревается тепловым потоком заданной интенсивности в поперечном (трансверсальном) направлении относительно его плоскости. Поэтому ранее предполагали, что изменение схемы армирования ($[0^\circ]$, $[90^\circ]$, ортотропная или квазиизотропная) не должно оказывать существенного влияния на эти характеристики пожарной опасности, хотя при переходе от однонаправленной к ортотропной или квазиизотропной схеме армирования могут меняться условия выхода на поверхность образующихся газообразных продуктов термодеструкции. Но принципиальных различий между результатами испытаний образцов с вертикальной $[0^\circ]$ или горизонтальной $[90^\circ]$ схемами армирования быть не должно.

Однако поджигание образцов при проведении испытаний на тепловыделение и дымообразование осуществляется в нижней части лицевой поверхности вертикально установленного образца маленькой пилотной горелкой и, следовательно, может меняться кинетика распространения пламени и охвата огнем всей поверхности испытываемого образца. Этот эффект должен быть больше при испытаниях на тепловыделение при горении вследствие как большей в 4 раза площади образцов (размер образцов для испытаний на тепловыделение и дымообразование составляет 150×150 и 75×75 мм соответственно), так и точечного воздействия пламени от пилотной горелки.

Все большее применение в авиационной отрасли получают углепластики и трехслойные сотовые панели на их основе [25–27]. Поэтому решено оценить возможное влияние схемы армирования углепластиков на показатели тепловыделения. Этому исследованию посвящена данная работа.

Работа выполнена в рамках реализации 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].

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны отечественные углепластики на основе эпоксидного связующего [29], жгутового наполнителя и однонаправленной ткани

из углеродного жгута российского производства. В данных материалах отечественный углеродный наполнитель заменяет ранее использовавшийся импортный [30]. Для проведения исследований изготовлены по три партии плит каждой толщины с однонаправленной структурой армирования. Из каждой плиты в соответствии с нормативной документацией вырезаны образцы размером $(150\pm 1)\times(150\pm 1)$ мм, за исключением отдельных случаев, описанных далее.

В данном исследовании толщина образцов углепластика с однонаправленной структурой армирования на основе углеродного волокна составила ~ 3 мм (структура армирования $[0^\circ]_{15}$), толщина образцов углепластика с однонаправленной структурой армирования на основе однонаправленной углеродной ткани: $\sim 2,3$; ~ 3 и ~ 4 мм (структуры армирования $[0^\circ]_{13}$, $[0^\circ]_{15}$ и $[0^\circ]_{20}$ соответственно).

Огневые испытания на тепловыделение при горении проводили в соответствии с методом, описанным в ГОСТ Р 57928–2017 и изложенным в Части IV Приложения F российских авиационных норм НЛГ-25. Для проведения испытаний в соответствии с требованиями авиационных норм используется специализированное оборудование – работающий по термопарному методу модифицированный проточный калориметр типа OSU (ASTM E906 Конфигурация А) с установленным тепловым режимом: тепловой поток на образец $35 \text{ кВт/м}^2 (\pm 5 \%)$, расход воздуха через установку $40 \text{ л/с} (\pm 5 \%)$.

Вследствие ограниченной производительности испытательного оборудования весь объем образцов физически невозможно было испытать в один день. Для обеспечения максимальной воспроизводимости результатов все образцы из одной партии испытывали в один день при одной и той же настройке и калибровке оборудования. По возможности испытания образцов материалов одной и той же толщины также старались провести в один день.

В соответствии с требованиями авиационных норм, должны быть испытаны не менее трех образцов каждого вида. Для проведения исследований два одинаковых образца из каждой партии устанавливали в держатели образца с одной ориентацией наполнителя (вертикальной или горизонтальной), а третий образец испытывали с иной (перпендикулярной по отношению к другим образцам) ориентацией.

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

Результаты и обсуждение

Полученные результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики тепловыделения при горении образцов
однонаправленного углепластика на основе углеродного волокна

Толщина, мм	Номер партии изготовления	Масса образца, г	Ориентация наполнителя	Максимальная интенсивность тепловыделения (пик), кВт/м ²	Время достижения максимальной интенсивности тепловыделения, с	Общее количество выделившегося за первые 2 мин тепла, кВт·мин/м ²
3,0	1	102,81	$[0^\circ]$	143	119	71
		102,13	$[90^\circ]$	141	112	75
		104,08	$[0^\circ]$	153	114	74
2,7	2	102,17	$[0^\circ]$	144	113	73
		101,49	$[90^\circ]$	143	108	82
		101,42	$[0^\circ]$	146	111	79
2,7	3	104,11	$[0^\circ]$	153	116	74
		104,24	$[90^\circ]$	137	110	82
		103,82	$[0^\circ]$	141	108	80

**Характеристики тепловыделения при горении образцов
однонаправленного углепластика на основе однонаправленной углеродной ткани**

Толщина, мм	Номер партии изготовления	Масса образца, г	Ориентация наполнителя	Максимальная интенсивность тепловыделения (пик), кВт/м ²	Время достижения максимальной интенсивности тепловыделения, с	Общее количество выделившегося за первые 2 мин тепла, кВт·мин/м ²
2,3	1	86,78	[0°]	135	111	105
		85,63	[90°]	124	108	104
		86,34	[0°]	133	113	103
	2	85,29	[0°]	124	111	101
		87,22	[90°]	124	112	94
		86,87	[90°]	120	106	98
	3	86,69	[0°]	120	111	95
		86,43	[90°]	117	108	93
		86,79	[0°]	129	108	98
2,9	1	99,60	[0°]	140	127	65
		99,95	[90°]	156	127	64
		97,54	[0°]	162	124	70
	2	98,18	[90°]	139	133	60
		97,99	[0°]	157	126	69
		97,72	[90°]	123	130	54
	3	99,23	[0°]	155	124	64
		98,90	[90°]	130	129	60
		108,74	[0°]	146	125	64
3,9	1	143,37	[0°]	172	167	29
		141,96	[90°]	156	168	32
		142,95	[0°]	177	164	37
	2	142,35	[90°]	168	176	19
		142,19	[0°]	179	170	23
		142,29	[90°]	166	165	27
	3	141,68	[90°]	150	186	20
		141,98	[0°]	166	166	26
		141,16	[90°]	142	173	22

При анализе полученных данных можно отметить следующее.

Для образцов углепластика на основе углеродного волокна (табл. 1) с горизонтальным расположением армирующего наполнителя по сравнению с вертикальным можно отметить более низкие значения максимальной интенсивности выделения тепла при более раннем наступлении пика, а также более высокие значения общего количества тепла, выделившегося за первые 2 мин испытания. Однако эти различия невелики и близки к величине разброса данных между параллельными испытаниями. Для образцов этого углепластика по характеристике максимальной интенсивности выделения тепла (пик) для установленных в держателе образцов с горизонтальным расположением волокон углеродного наполнителя по сравнению с вертикальной ориентацией отмечается меньшее тепловыделение (на ~7 кВт/м², или 5 %). Различие между образцами с различной ориентацией наполнителя по величине общего количества выделившегося тепла составляет ~4,5 кВт·мин/м², или 6 %.

Для углепластика на основе однонаправленной углеродной ткани (табл. 2) на данном этапе исследований не выявлено различий между вертикальной и горизонтальной ориентацией наполнителя в испытываемом образце по характеристикам общего количества тепла, выделившегося за первые 2 мин испытания, и времени наступления максимальной интенсивности тепловыделения. Для образцов этого углепластика различие между значениями максимальной интенсивности выделения тепла в зависимости

от ориентации наполнителя более существенное. Зачастую разница между параллельными испытаниями в зависимости от ориентации наполнителя достигает 10–20 единиц и возрастает по мере увеличения толщины образца. Различие по максимальной интенсивности тепловыделения при вертикальном и горизонтальном направлении армирования для образцов толщиной 2,3 мм составляет ~ 7 кВт/м² (5,5 %), толщиной 2,9 и 3,9 мм: ~ 17 кВт/м² (12 и 10 % соответственно).

Зафиксированным исключением из этого наблюдения является результат испытания первого из партии 2 образца толщиной 2,3 мм. Значения максимальной интенсивности выделения тепла образцов с вертикальной и горизонтальной ориентацией основы в этой партии практически равны. Это можно объяснить тем, что образец с вертикальной ориентацией основы наполнителя имел немного меньшую массу по сравнению с двумя другими образцами из этой же партии.

Результат испытаний образца углепластика на основе однонаправленной углеродной ткани толщиной 2,9 мм из партии 1 с вертикальным армированием не совсем корректный (в табл. 2 выделен жирным шрифтом), так как для испытаний был изготовлен образец меньшего размера (142×142 мм вместо 150×150 мм) и в держателе образец был закреплен выше инициирующей воспламенение нижней пилотной горелки. Вследствие этого пламя нижней воспламеняющей (пилотной) горелки на образец почти не воздействовало, воспламенение образца произошло позже и с меньшей интенсивностью.

Заключения

Установлено, что для углепластиков с однонаправленной структурой армирования при испытаниях на тепловыделение при горении существует различие в максимальной интенсивности выделения тепла в зависимости от пространственной ориентации наполнителя.

Образцы, которые при закреплении в держателе были установлены таким образом, что осуществлялось горизонтальное расположение армирующих волокон (жгутов, основы однонаправленной ткани), имели меньшую интенсивность выделения тепла по сравнению с вертикальной структурой армирования.

Величина различия между данными максимальной интенсивности выделения тепла для однонаправленного углепластика на основе углеродной ткани возрастает при увеличении толщины с 2,3 до 2,9 и 3,9 мм.

В зависимости от толщины материала разница между образцами с различной пространственной ориентацией наполнителя по характеристике максимальной интенсивности выделения тепла составляет от 5 до 12 %.

Список источников

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). С. 81–92. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 61–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
4. Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р. Пожаробезопасность конструкционных органопластиков, армированных арамидными тканями // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 4 (69). С. 51–60. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.

5. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). С. 59–71. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
6. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Воробьев Н.Н. Вопрос создания физических и математических моделей тепло- и массопереноса при изготовлении деталей методом аддитивных технологий (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 111–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
7. Cambell S., Jensen M., Sattayatam P. Flammability Standardization Task Group – Final Reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo, AMN-115-09-XXX, August 20, 2009: FAA Report DOT/FAA/TC-12/10. 2012. 881 p. URL: www.abbottaerospace.com/downloads/dot-faa-tc-12-10-flammability-standartization-task-group-final-reports-faa-draft-policy-memo-amn-115-09-xxx-8-20-2019/?wpdmdl=375748&ind=1500917973133 (дата обращения: 12.01.2026).
8. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 408 с.
9. Барботько С.Л. Тепловыделение при горении полимерных материалов авиационного назначения: дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 148 с.
10. Сидорина А.И., Сафронов А.М. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). С. 63–73. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
11. Барботько С.Л., Дементьева Л.А., Сереженков А.А. Горючесть стекло- и углепластиков на основе клеевых препрегов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2008. № 7. С. 29–31.
12. Барботько С.Л., Изотова Т.Ф. Влияние структуры стеклопластика на тепловыделение при горении // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 9. С. 17–21.
13. Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Исследование возможности снижения тепловыделения при горении композиционного материала путем изменения его структуры // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 1. С. 27–30.
14. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Кобылков Н.В., Никольчинкин А.А., Антипов Е.А. Экспериментальное и расчетное моделирование огне- и теплозащиты композиционных материалов в условиях высокотемпературного воздействия // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). С. 84–97. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97.
15. Нормы летной годности самолетов транспортной категории НЛГ 25: утв. приказом Федерального агентства воздушного транспорта от 27 декабря 2022 г. № 961-П. URL: <https://old.favt.gov.ru/public/materials/f/a/2/a/1/fa2a15afd4447e2d98ec15d70297a04a.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
16. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства. 8-е изд. с поправками 1-11. СПб.: СЗ РЦАИ, 2025. 358 с. URL: <https://armakstandard.com/book/авиационные-правила-25-нормы-летной-годности-самолетов-транспортной-категории-ру-конс-12437> (дата обращения: 12.01.2026).
17. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25). Amendment 28. 1515 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> (дата обращения: 12.01.2026).
18. Federal Regulations. Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes. URL: <http://https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-25?toc=1> (дата обращения: 12.01.2026).
19. Rehn S. Vertical Bunsen Burner Testing of 3-D Printed Material // *International Aircraft Materials Fire Test Forum*. Cologne, 2019. 12 p. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/ppt/materials/June19Meeting/Rehn-0619-AdditiveManufacturing.pptx> (дата обращения: 12.01.2026).
20. Rehn S., Keslar D. Relationship between 3-D printed materials and flammability // *International Aircraft Materials Fire Test Forum*. 2021. 25 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/materials/April21Meeting/Rehn-0421-AdditiveManufacturingTesting.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).

21. Keslar D., Rehn S. Relationship between 3-D printed materials and flammability // Tenth Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference. 2022. 21 p. URL: http://www.fire.tc.faa.gov/2022Conference/files/Cabin_Flight_Deck_Fire_Protection_I/Keslar3DPrint_Pres.pdf (дата обращения: 12.01.2026).
22. Keslar D., Rehn S. An Evaluation of the Flammability of 3D Printed Part Parameters Using the Vertical Bunsen Burner Test Method: Technical Report DOT/FAA/TCTN-23/65. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, W.J. Hughes Technical Center, 2023. 85 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/tctn23-65.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
23. Барботько С.Л., Вольный О.С., Постнов В.И., Шуркова Е.Н. Исследование влияния структуры армирования на характеристики пожарной опасности стеклопластика // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). С. 108–120. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-108-120.
24. Барботько С.Л., Вольный О.С., Мараховский П.С. Исследование влияния схемы армирования на характеристики горючести углепластика // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 103–110. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-103-110.
25. Гуляев И.Н., Павловский К.А. Высокомодульные углепластики для изделий гражданской авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). С. 95–106. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106.
26. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Савицкий Р.С., Славин А.В. К вопросу изготовления огнестойких и огнепроницаемых капотов мотогондол силовой установки вертолетной техники из полимерных композиционных материалов. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). С. 123–133. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-123-133.
27. Ерасов В.С., Сибаяев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания образцов из трехслойных конструкций с сотовым наполнителем // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). С. 133–155. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-133-155.
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. Гамазина А.В., Курносоев А.О., Вавилова М.И., Кочетов Н.Р. Исследование свойств стеклопластика радиотехнического назначения на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212 // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). С. 56–65. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-56-65.
30. Платонов А.А., Душин М.И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // Труды ВИАМ. 2015. № 11. С. 50–54. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.

References

1. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Slavin A.V., Donetskii K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 81–92. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 61–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.

4. Kan A.Ch., Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Ayupov T.R. Fire safety of structural organic plastics reinforced with aramid fabrics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), pp. 51–60. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.
5. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 59–71. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
6. Marakhovskij P.S., Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Vorobev N.N. On creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer during manufacturing by additive technologies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 111–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
7. Cambell S., Jensen M., Sattayatom P. Flammability Standardization Task Group – Final Reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo, AMN-115-09-XXX, August 20, 2009; FAA Report DOT/FAA/TC-12/10, 2012, 881 p. Available at: www.abbottaerospace.com/downloads/dot-faa-tc-12-10-flammability-standartization-task-group-final-reports-faa-draft-policy-memo-amn-115-09-xxx-8-20-2019/?wpdmdl=375748&ind=1500917973133 (accessed: January 12, 2026).
8. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyyenko O.A., Shurkova E.N. *Fire safety assessment of polymeric materials for aviation purposes*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 408 p.
9. Барботько С.Л. Тепловыделение при горении полимерных материалов авиационного назначения: дис. ... канд. техн. наук. М., 1999, 148 с.
10. Sidorina A.I., Safronov A.M. Study of the resistance of carbon fibers to oxidation. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), pp. 63–73. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
11. Barbotko S.L., Demytyeva L.A., Serezhenkov A.A. Combustibility of fiberglass and carbon fiber reinforced plastics based on adhesive prepregs. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2008, no. 7, pp. 29–31.
12. Barbotko S.L., Izotova T.F. Influence of fiberglass structure on heat release during combustion. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 17–21.
13. Shurkova E.N., Volny O.S., Izotova T.F., Barbotko S.L. Research of possibility of decrease in heat release when burning composite material by change of its structure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 1, pp. 27–30.
14. Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Kobylkov N.V., Nikolchenkin A.A., Antipov E.A. Experimental and computational modeling of fire and thermal protection composite materials under high-temperature exposure. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 84–97. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97.
15. *Airworthiness standards for transport category aircraft NLG 25*: approved by Order of the Federal Air Transport Agency dated December 27, 2022 No. 961-P. Available at: <https://old.favt.gov.ru/public/materials/f/a/2/a/1/fa2a15afd4447e2d98ec15d70297a04a.pdf> (accessed: January 12, 2026).
16. *Airworthiness standards for transport category aircraft: AP-25*: approved by Resolution of the 28th session of the Aviation and Airspace Use Council. 8th ed. with amendments 1-11. St. Petersburg: SZ RTsAI, 2025, 358 p. Available at: <https://armakstandard.com/book/авиационные-правила-25-нормы-летней-годности-самолетов-транспортной-категории-ру-конс-12437> (accessed: January 12, 2026).
17. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25)*. Amendment 28, 1515 p. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> (accessed: January 12, 2026).
18. *Federal Regulations. Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes*. Available at: <http://https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-25?toc=1> (accessed: January 12, 2026).
19. Rehn S. Vertical Bunsen Burner Testing of 3-D Printed Material. *International Aircraft Materials Fire Test Forum*. Cologne, 2019, 12 p. Available at: <http://www.fire.tc.faa.gov/ppt/materials/June19Meeting/Rehn-0619-AdditiveManufacturing.pptx> (accessed: January 12, 2026).

20. Rehn S., Keslar D. Relationship between 3-D printed materials and flammability. *International Aircraft Materials Fire Test Forum*. 2021. 25 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/materials/April21Meeting/Rehn-0421-AdditiveManufacturingTesting.pdf> (accessed: January 12, 2026).
21. Keslar D., Rehn S. Relationship between 3-D printed materials and flammability. *Tenth Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference*. 2022. 21 p. URL: http://www.fire.tc.faa.gov/2022Conference/files/Cabin_Flight_Deck_Fire_Protection_I/Keslar3DPrint_Pres.pdf (дата обращения: January 12, 2026).
22. Keslar D., Rehn S. *An Evaluation of the Flammability of 3D Printed Part Parameters Using the Vertical Bunsen Burner Test Method: Technical Report DOT/FAA/TCTN-23/65*. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, W.J. Hughes Technical Center, 2023, 85 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/tctn23-65.pdf> (accessed: January 12, 2026).
23. Barbotko S.L., Volnyj O.S., Postnov V.I., Shurkova E.N. Investigation of the effect of reinforcement structures on fire hazard characteristics of the fiberglass. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), pp. 108–120. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-108-120.
24. Barbotko S.L., Volnyj O.S., Marakhovskii P.S. Investigation of the influence of the reinforcement scheme on the combustibility characteristics of carbon fiber reinforced polymer material. *Trudy VIAM*, 2019, no. 10 (82), pp. 103–110. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-103-110.
25. Gulyaev I.N., Pavlovskiy K.A. High modulus carbon plastics for civil aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), pp. 95–106. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106.
26. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Savitsky R.S., Slavin A.V. On the question of manufacturing fire-resistant and fireproof hoods of helicopter power plant engine nacelles from polymer composite materials. Part 1. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 123–133. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-123-133.
27. Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I. Testing of samples from three-layer structures with honeycomb filler. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), pp. 133–155. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-133-155.
28. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
29. Gamazina A.V., Kurnosov A.O., Vavilova M.I., Kochetov N.R. Investigation of fiberglass properties based on the melt binder VSE-1212 for radio engineering purposes. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), pp. 56–65. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-56-65.
30. Platonov A.A., Dushin M.I. Carbon composites VKU-25 based on unidirectional prepreps. *Trudy VIAM*, 2015, no. 11, pp. 50–54. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.

Информация об авторах

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

Боченков Михаил Михайлович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Клименко Оксана Николаевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Mikhail M. Bochenkov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oksana N. Klimenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.02.2026.
The article was submitted 12.02.2026; approved and accepted for publication after reviewing 13.02.2026.