

Научная статья

УДК 678.8:614.84

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЮЧЕСТИ, ДЫМООБРАЗОВАНИЯ И ТОКСИЧНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

А.И. Старков¹, К.Е. Куцевич¹, А.Ю. Исаев¹, С.Л. Барботько¹, А.А. Баранников¹

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

Аннотация. Проведена комплексная оценка горючести, дымообразования и токсичности углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ, стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП) и трехслойных сотовых конструкций на их основе требованиям авиационных норм. По результатам испытаний на горючесть установлено полное соответствие требованиям авиационных норм углепластика марки ВКУ-59, стеклопластика марки ВПС-68 и сотовых конструкций на их основе.

Ключевые слова: углепластик, стеклопластик, клеевой препрег, клеевые соединения, горючесть, дымообразование, токсичность, трехслойные конструкции

Для цитирования: Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Барботько С.Л., Баранников А.А. Исследование горючести, дымообразования и токсичности в процессе горения полимерных композиционных материалов и трехслойных сотовых конструкций на их основе // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.

Scientific article

STUDY OF FLAMMABILITY, SMOKE FORMATION AND TOXICITY IN THE PROCESS OF COMBUSTION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND THREE-LAYER HONEYCOMB STRUCTURES BASED ON THEM

A.I. Starkov¹, K.E. Kutsevich¹, A.Yu. Isaev¹, S.L. Barbotko¹, A.A. Barannikov¹

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

Abstract. The complex estimation of combustibility of smoke formation and toxicity of carbon fiber-reinforced plastic of mark VKU-59 on the basis of adhesive prepreg of mark KMKU-6.80.UV and glass fiber-reinforced plastic of mark VPS-68 on the basis of adhesive prepreg of mark KMKS-6.80.T60(VMP), as well as three-layer honeycomb structures on their basis to the requirements of aviation norms has been carried out. According to the results of tests of carbon fiber-reinforced plastic of mark VKU-59, fiberglass plastic of mark VPS-68, and honeycomb structures on their basis for combustibility, full compliance with the requirements of aviation standards was established.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, fiberglass, adhesive prepreg, adhesive compounds, combustibility, smoke formation, toxicity, three-layer structures

For citation: Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Barbotko S.L., Barannikov A.A. Study of flammability, smoke formation and toxicity in the process of combustion of polymer composite materials and three-layer honeycomb structures based on them. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.

Введение

В условиях импортозамещения, а также для достижения весовой эффективности, обусловленной заменой традиционных металлических материалов на современные, разработчики авиационной техники все чаще обращаются к полимерным композиционным материалам (ПКМ) с заданным уровнем прочностных свойств [1–4].

Помимо повышенных прочностных характеристик, для материалов, применяемых в интерьере воздушных судов и других транспортных средств, имеют значение дополнительные требования к пожарной безопасности в пределах рабочих температур. Эти требования особенно актуальны в связи с заменой в некоторых узлах авиационных изделий металлических компонентов на ПКМ, обеспечивающие снижение массы, но в то же время являющиеся горючими. При разработке нового поколения самолетов, в которых планируется увеличить долю ПКМ, необходимо решить задачу создания материалов с новым набором свойств, отвечающих жестким требованиям, включая пожаробезопасность (при использовании ПКМ в авиационном интерьере).

Одним из важнейших вопросов обеспечения пожаробезопасности является надежность экранирования зон с высокой вероятностью возникновения пожара (пожароопасных зон) от других элементов планера – пассажирских и багажно-грузовых отсеков.

Цель исследований – установление соответствия свойств углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 требованиям отечественных авиационных норм, представленных в НЛГ 25 и АП-25 (п. 25.853 (а) и п. 25.855 (d)), к горючести в соответствии с методом испытаний, изложенным в Части I (а) (i) Приложения F данных документов.

По результатам испытаний на углепластик ВКУ-59 оформлен паспорт № 1994, на стеклопластик марки ВПС-68 – паспорт № 1995. Организован серийный выпуск разработанных материалов на сертифицированном производстве в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Объектами исследования являются углепластик марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ (ТУ 1-595-11-1775–2018) и стеклопластик марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП) (ТУ 1-595-11-1776–2018), разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Препреги представляют собой углеродный жгутовый наполнитель и стеклоткань, пропитанные эпоксидным клеевым связующим пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплостойкостью 80 °С. Углепластик ВКУ-59 является аналогом углепластика HexPly M56/40%/193PW/AS4-3K (фирма Hexcel, США), стеклопластик ВПС-68 – аналогом стеклопластика HexPly M76/37%/7781 (фирма Hexcel, США).

Свойства углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевых препрегов исследовали на образцах, изготовленных методом автоклавного формования [5–19].

Согласно федеральным (государственным) авиационным нормам, все декоративно-отделочные и конструкционные материалы, используемые во внутренней

отделке пассажирских салонов и багажно-грузовых отсеков, должны соответствовать требованиям по ограничению горючести. В Российской Федерации в настоящее время действуют как международные Авиационные правила, установленные Международным авиационным комитетом, так и Нормы летной годности, введенные Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация). Тексты этих документов и предъявляемые в них требования практически идентичны.

Требования в части пожарной безопасности зависят как от типа (вертолеты, самолеты, аэростаты) и категории (легкая, транспортная, очень легкая, беспилотная) авиационной техники, так и от функционального назначения материала. Наиболее жесткие требования в части пожарной безопасности АП-25 и НЛГ 25 предъявляют к материалам, используемым в пассажирских салонах больших (транспортных) самолетов. Кроме того, авиастроительные корпорации вправе устанавливать свои более жесткие или дополнительные требования к материалам, применяемым в конструкциях их авиационной техники.

Для определения возможности допуска к применению в авиастроении исследованы характеристики пожарной опасности указанных материалов: горючесть, дымообразование и токсичность на основе измерения концентраций газов, выделяющихся при термодеструкции.

Горючесть

В соответствии с требованиями авиационных норм (п. 25.853 (а) параграфа 25.853 «Внутренняя отделка кабин» и п. 25.855 (d) параграфа 25.855 «Грузовые и багажные отсеки»), все используемые материалы должны удовлетворять применимым к ним критериям испытаний, предписанным в Части I Приложения F. Соответствующие методы испытаний приведены также в ГОСТ Р 57924–2017. Перечисленные документы предусматривают несколько методов испытаний. Для конструкционных материалов в зависимости от их функционального назначения могут использоваться вертикальный метод испытания с экспозицией пламенем горелки в течение 60 с (п. (а) (1) (i) Части I) и 12 с (п. (а) (1) (ii) Части I), а также метод испытаний под углом 45 градусов к горизонту (пп. (а) (2) (ii) и (iii) Части I). В данной работе выполнены исследования с использованием вертикального метода испытаний с экспозицией пламенем горелки в течение 60 с.

Сущность метода заключается в воздействии малокалорийного источника воспламенения (пламя лабораторной газовой горелки) на нижнюю часть вертикально установленного образца в течение заданного времени. Способность образца к самостоятельному прекращению горения определяется по длине прогорания, времени остаточного (самостоятельного) горения после удаления источника воспламенения, наличию и продолжительности горения падающих капель. Материалы считаются соответствующими требованиям авиационных норм, если при экспозиции образца пламенем горелки в течение 60 с продолжительность остаточного горения составляет ≤ 15 с, длина прогорания ≤ 152 мм (6 дюймов), продолжительность горения капель ≤ 3 с.

Дымообразование

Требования по ограничению дымообразования (оптической плотности дыма) в современных федеральных авиационных нормах предъявляются только к панелям потолка, стен и перегородок пассажирской кабины (п. 25.853 (d)). В соответствии с указанным пунктом, испытания должны проводиться по методике, приведенной в Части V Приложения F, т. е. по ГОСТ 24632–81. Регламентированной характеристикой,

определяющей допустимость применения материалов, является величина оптической плотности дыма, достигаемая в течение первых 4 мин испытания (не более 200 ед.). В зарубежных федеральных авиационных нормах требуется проведение испытаний только в режиме горения, в отечественных нормах (АП-25 и НЛГ 25) режим испытания не указан. Таким образом, испытания требуется проводить в двух режимах – горение и пиролиз.

Этот же п. 25.853 (d) авиационных норм требует определения тепловыделения при горении по методике, изложенной в Части IV Приложения F. При этом испытаниям как на дымообразование, так и на тепловыделение должны подвергаться образцы конструкционных панелей вместе с нанесенным декоративным покрытием.

В соответствии с требованиями федеральных авиационных норм, как отечественных, так и зарубежных, дымообразование панелей пола, а также панелей багажных и грузовых отсеков не регламентируется. Но авиастроительные корпорации вправе устанавливать свои дополнительные требования. При этом может регламентироваться максимально допустимая оптическая плотность дыма не только через 4 мин, но также и через 90 с от начала испытания.

Дымообразование образцов углепластика и стеклопластика на соответствие требованиям авиационных норм (Приложение F, Часть V) оценивали согласно ГОСТ 24632–81 (зарубежные аналоги – ASTM E662–2021 и ASTM F814–2019). Сущность метода испытаний заключается в воздействии в герметичной камере на вертикально установленный образец теплового потока заданной интенсивности (25 кВт/м^2) и пламени многорожковой газовой горелки (режим испытания – горение) или только теплового потока (режим испытания – пиролиз или тление). Через образующиеся парогазовые продукты термической деструкции и горения проходит световой луч заданной интенсивности, по степени ослабления которой судят об оптической плотности дыма в каждый текущий момент времени.

Токсичность продуктов горения

Ни в отечественных, ни в зарубежных федеральных авиационных нормах ни к каким материалам не предъявляют требований по ограничению токсичности продуктов горения. Но зарубежные авиастроительные корпорации, например Boeing, Airbus, Bombardier, устанавливают такие требования к материалам, применяемым в конструкциях их самолетов. При этом в зависимости от корпорации требования различаются.

Существуют различные методы определения токсичности продуктов горения, наибольшее распространение получили два варианта – по смертности лабораторных животных и на основе измерения концентраций некоторых (основных) выделяющихся газов. Наиболее просто реализуется метод измерения концентраций газов, образующихся в дымовой камере в процессе определения оптической плотности дыма с помощью одноразовых газоанализаторных трубок. Именно такой метод используют в корпорациях Boeing, Airbus, Bombardier. Этот метод применен в данном исследовании.

Результаты и обсуждение

В соответствии с утвержденной нормативной документацией на материалы, по разработанному режиму отверждения методом автоклавного формования изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68. Полученные из отформованных плит образцы испытаны на пожаробезопасность.

Результаты испытаний образцов на горючесть в соответствии с требованиями авиационных норм приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59
и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть в вертикальном положении
при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 с**

Материал	Толщина образца, мм	Продолжительность остаточного горения (средняя), с	Длина прогорания (средняя), мм	Продолжительность горения капель, с
ВКУ-59	1,11	0	56,3	0
	2,10	2,3	59,0	
	3,99	1,0	39,0	
ВПС-68	1,23	0	72,0	
	2,28	1,6	53,3	
	4,18	0,6	46,3	
Допустимые значения по НЛГ 25, Приложение F, Часть I (a) (1) (i), не более		15	152	3

Как видно из табл. 1, углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68 на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 соответствуют требованиям авиационных норм по горючести.

Одним из видов пожарной опасности, присущих полимерным материалам, в том числе ПКМ, является способность выделять дым. Мелкодисперсные конденсированные частицы, образующиеся в процессе термоокислительной деструкции, приводят к снижению видимости, что затрудняет ориентацию в пространстве и способствует возникновению паники. Кроме того, такие частицы адсорбируют (абсорбируют) токсичные соединения, попадание которых в дыхательные пути человека наносит вред его здоровью и может привести к преждевременной смерти.

Поэтому определение данного показателя пожарной опасности для полимерных материалов должно быть неотъемлемой частью исследований при проектировании конструкций (деталей) из ПКМ, которые планируется применять во внутренней части самолета.

Как отмечено ранее, ПКМ, предназначенные для использования в самолете в качестве отделки стен, потолка, перегородок пассажирской кабины, должны соответствовать требованиям авиационных норм по дымообразованию, при этом удельная оптическая плотность дыма за 4 мин не должна превышать 200 ед. Однако это требование, изложенное в федеральных авиационных нормах, относится только к панелям стен и потолка в месте постоянного пребывания пассажиров (пассажирская кабина с количеством мест не менее 20). Данные требования не относятся к местам временного пребывания (туалеты, коридоры, кухни), кабине пилотов и багажно-грузовому отсеку. Высокая дымообразующая способность материалов, из которых изготовлены панели багажно-грузовых отсеков, может способствовать более быстрому срабатыванию датчиков дыма и оперативному информированию экипажа о возникновении пожара в местах, где обычно во время полета отсутствуют люди.

Эти требования федеральных авиационных норм не относятся к материалам другого функционального назначения, например к панелям пола. Это объясняется тем, что панели пола расположены в нижней части кабины. При проникновении открытого пламени в пассажирскую кабину в случае летного происшествия тепловой поток, падающий на нижнюю часть кабины, будет значительно меньше, чем тепловой поток, попадающий на стены и потолок. Кроме того, панели пола закрыты декоративным покрытием (линолеум, ковер, антискользящее покрытие) и в основном экранированы от пламени другими предметами (кресла). Поэтому целесообразнее определять

дымообразующую способность не панелей пола, а именно декоративных покрытий. Именно такой подход реализован в авиационных нормах корпораций.

Тем не менее для получения информации о потенциальной опасности углепластика ВКУ-59 и стеклопластика ВПС-68 проведены исследования по определению дымообразующей способности. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68
на основе клеевого связующего на дымообразующую способность**

на основе классификации связующего на дымообразующую способность					
Материал	Толщина образца, мм	Режим испытания	Удельная оптическая плотность дыма		
			D_2	D_4	$D_{\max}$
ВКУ-59	0,41	Горение	125	129	130
		Пиролиз	113	172	190
	0,83	Горение	250	257	258
		Пиролиз	238	264	281
	1,10	Горение	333	343	344
		Пиролиз	208	312	319
	2,07	Горение	373	403	405
		Пиролиз	81	287	303
	4,39	Горение	238	626	655
		Пиролиз	3	166	445
ВПС-68	0,38	Горение	64	93	98
		Пиролиз	74	96	103
	0,79	Горение	147	180	182
		Пиролиз	130	162	162
	1,18	Горение	438	450	451
		Пиролиз	262	343	345
	2,22	Горение	609	639	639
		Пиролиз	138	461	473
	4,20	Горение	138	461	473
		Пиролиз	338	818	639
Допустимые значения по НЛГ 25, Приложение F, Часть V (b), не более			—	200	—

Углепластик марки ВКУ-59 толщиной 0,41 мм и стеклопластик марки ВПС-68 толщиной до 0,79 мм, изготовленные на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6, имеют оптическую плотность дыма меньше предельно допустимого значения (200 ед.). Испытанные образцы ПКМ на основе этого связующего больших толщин имеют оптическую плотность дыма >200 ед.

Панели пола занимают значительную часть самолета. В магистральных самолетах с количеством мест от 200 их площадь превышает 100 м², с количеством мест от 24 до 80 составляет 14–45 м². Применение ПКМ при изготовлении панелей пола воздушных судов позволяет уменьшить массу изделий и значительно увеличить их долговечность, при этом сохраняя прочность и жесткость. Формованием (методом прессования) изготовлены образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола из углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ и стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП). Далее представлены результаты исследований пожаробезопасности конструктивных элементов (трехслойные сотовые панели), изготовленных с обшивками из указанных ПКМ.

В табл. 3 приведены характеристики горючести трехслойных сотовых панелей.

Таблица 3

**Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций
панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59
и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть**

Материал	Толщина образца, мм	Продолжи- тельность экспозиции пламенем горелки, с	Продол- жительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм	Продолжи- тельность горения капель, с
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,28	60	0	9	0
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,06			84	
Допустимые значения по НЛГ 25, Приложение F, Часть I (a) (1) (i), не более			15	152	3

Установлено, что образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых препрегов угле- и стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 по характеристикам горючести отвечают требованиям отечественных и зарубежных федеральных авиационных норм и корпоративных стандартов (Приложение F, Часть I (a) (1) (i)).

Проведены испытания образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола на соответствие требованиям АП-25 (Приложение F, Часть V) по дымообразующей способности с целью определения возможности их применения во внутренней части самолета (табл. 4).

Таблица 4

**Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций
панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59
и стеклопластика марки ВПС-68 на дымообразующую способность**

Материал	Толщина образца, мм	Режим испытания	Показатель удельной оптической плотности дыма		
			D_2	D_4	D_{max}
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,36	Горение	159	199	205
	10,38	Пиролиз	137	160	171
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,49	Горение	201	233	236
	10,54	Пиролиз	129	156	177
Допустимые значения					
АП-25, Приложение F, Часть V, не более		Горение	—	200	—
FAR/CS-25.853, Appl. F, part V, не более		Горение	—	200	—
ABD 0031 (Airbus)		Горение	—	250	—
		Пиролиз	—	150	—

Образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 без декоративного покрытия имеют оптическую плотность дыма через 4 мин горения ≤ 200 ед. Оптическая плотность дыма трехслойной сотовой панели с обшивками из стеклопластика ВПС-68 превышает 200 ед.

Как отмечено в работе [20], в условиях пожара опасность для человека определяется следующими факторами: воздействие высоких температур, распространение пламени по поверхности материалов, снижение видимости из-за выделения дыма и образование токсичных продуктов горения. Увеличение доли применения ПКМ во внутренней части самолета за последние годы существенно повысило вероятность отравления пассажиров продуктами горения. В связи с этим важной задачей для обеспечения пожарной безопасности ПКМ и конструкций на их основе является определение токсичности продуктов горения.

Поскольку в федеральных (государственных) авиационных нормах требования по токсичности продуктов горения не предъявляются, каждая авиастроительная корпорация сама принимает решение о необходимости введения требований по токсичности к материалам, применяемым в их авиационной технике, а также определяет метод испытания и предельно допустимые значения.

В процессе термического воздействия из ПКМ выделяется широкий спектр веществ, поэтому в мировой практике принято определять ограниченный перечень газов, максимально опасных для человеческого организма. Разными стандартами во внимание принимается различное количество газов. Например, военно-морской стандарт NATO STANAG 4602 подразумевает измерение концентраций 19 различных газов, при оценке токсичности по ГОСТ 12.1.044–89 определяются концентрации всего двух газов (CO и CO_2), некоторые документы устанавливают измерение концентраций трех газов (CO , CO_2 , HCl или CO , CO_2 , O_2).

В авиастроительных корпорациях Boeing и Airbus решили ограничиться измерением концентрации шести наиболее распространенных в продуктах горения неорганических токсичных газов, таких как NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), HCN , CO , HCl , SO_2 , HF . Компания Bombardier приняла решение измерять концентрации восьми газов: в перечень дополнительно включены углекислый газ и бромистый водород. Каждая из корпораций установила свои предельно допустимые значения концентраций газов. Концентрации газов измеряются в условиях проведения испытаний на дымообразование – отбор газов проводится непосредственно сразу после окончания теста.

Необходимо отметить, что установленные авиационными корпорациями предельно допустимые значения концентраций напрямую не связаны со среднесмертельными (вызывающими смертность 50 % лабораторных животных) концентрациями, предельно допустимыми концентрациями газов в воздухе пассажирских салонов самолетов (параграф 25.831 авиационных норм) или предельно допустимыми концентрациями в воздухе жилой застройки (например, согласно СанПиН 1.2.3685–21).

Учитывая пожелания отечественных авиастроителей – возможных потребителей разработанных материалов, проведены испытания образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 по определению токсичности продуктов горения (табл. 5). Для удобства сопоставления все значения приведены как в единицах измерения мг/м^3 , так и в концентрациях млн^{-1} (ppm). В этой же таблице представлены среднесмертельные концентрации, согласно зарубежным стандартам ASTM и ISO, установленные предельные концентрации.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что конструкции панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 полностью соответствуют международным стандартам, которые могут быть использованы в авиастроении. Вместе с тем установлено, что содержание угарного газа (оксида углерода) в режиме горения превышает пороговый показатель, который предъявляет корпорация ПАО «Яковлев» к своим изделиям.

Поскольку разработанные материалы не в полной мере соответствуют требованиям СБ-21 (ПАО «Яковлев»), изучение вопроса предельно допустимой концентрации угарного газа на человека представило дополнительный интерес.

Оксид углерода относится к ядовитым газам без запаха. В табл. 6 приведена информация из справочника [21] о симптомах отравления угарным газом человека.

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций
панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59
и стеклопластика марки ВПС-68 на токсичность**

Материал	Средняя толщина образца, мм	Режим испытания	Концентрация газов, мг/м ³ (ppm)								
			NO _x	HCN	CO	HCl	SO ₂	HF	HBr	CO ₂	O ₂
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,16	Горение	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	250 (200)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)	НИ		
		Пиролиз	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	100 (80)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)			
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,16	Горение	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	300 (240)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)			
		Пиролиз	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	150 (120)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)			
Допустимые значения											
ASTM E1678–2021	Пиролиз	Пиролиз	НР	181 (150)	НР	6030 (3700)	НР	НР	21400 (3000)	240000 (122000)	5,4 %
ISO 13344:2015			350 (170)	199 (165)	7120 (5700)	6200 (3800)	4000 (1400)	2590 (2900)	27100 (3800)		5,4 %
BSS 7239 (Boeing)	Горение	Горение	205 (100)	181 (150)	4375 3500	815 (500)	286 (100)	179 (200)	НР		
ABD 0031 (Airbus)			205 (100)	181 (150)	1250 (1000)	244 (150)		89 (100)			
SMP 800-C (Bombardier)			205 (100)	121 (100)	4375 (3500)	815 (500)			100 (714)	90000 (177000)	НР
СБ-21 (ПАО «Яковлев»)			13 (6,3)	13 (10,8)	200 (160)	1 (0,61)	1 (0,35)	1,5 (1,68)	НР		
Примечание. НИ – концентрация газа не измерялась, НР – концентрация газа не регламентируется.											

Таблица 6

**Сравнительная характеристика симптомов отравления
при длительном воздействии угарного газа**

Концентрация угарного газа, мг/м ³	Длительность воздействия	Симптомы отравления
80	8 ч	Отсутствуют
110	6,5 ч	
220	2–3 ч	
		Легкая боль в области лба
230	6 ч	Боль в области лба, ощущение давления на лоб, быстро исчезающее на свежем воздухе; расширение кожных кровеносных сосудов
230–340	5–6 ч	Головная боль, головокружение
440–460	2 ч	Боли в области лба и затылка
800–1000	20–30 мин	Головная боль, мышечная слабость, тошнота
1350	33–90 мин	Сердцебиение, легкое пошатывание, одышка при мышечной работе
1760	20 мин	Головная боль, головокружение, тошнота
3520	5–10 мин	Головная боль, головокружение
7040	1–2 мин	

В соответствии с требованиями СБ-21 (ПАО «Яковлев»), концентрация угарного газа не должна превышать 200 мг/м³ при горении материала в течение 90 с. Концентрация угарного газа, образующегося при горении трехслойной сотовой панели с обшивкой из углепластика ВКУ-59 и стеклопластика ВПС-68, составила 250 и 300 мг/м³ соответственно.

Продолжительность эвакуации из самолета в случае летного происшествия в соответствии с требованиями авиационных норм не должна превышать 1,5 мин (90 с). За это время при концентрации угарного газа 7000 мг/м³ у людей не происходит потери сознания и не теряется возможность передвижения.

В случае возникновения летного происшествия во время полета допустимая в обычных эксплуатационных условиях концентрация угарного газа 1 часть на 20000 частей воздуха (50 млн⁻¹) обеспечивается за счет вентиляции. Концентрация СО снижается с 240 млн⁻¹ (300 мг/м³) до 50 млн⁻¹ за счет всего пятикратного обмена воздуха.

В требованиях ПАО «Яковлев» предельно допустимые концентрации токсичных газов, по сравнению с аналогичными нормами зарубежных авиастроителей, занижены в 5–800 раз, а по сравнению с переносимыми без дальнейшего вреда концентрациями – завышены более чем в 35 раз для СО и более чем в 10–100 раз для других газов. Данное обстоятельство обращает внимание на необходимость внесения требований в СБ-21 (ПАО «Яковлев») исходя из общих принципов понимания токсикологии.

Заключения

По результатам испытаний на горючесть установлено полное соответствие требованиям авиационных норм углепластика марки ВКУ-59, стеклопластика марки ВПС-68 и сотовых конструкций на их основе.

Стекло-, углепластик и трехслойная панель на их основе обладают высокой дымообразующей способностью. Однако, согласно требованиям государственных авиационных норм, этот факт не является препятствием для применения трехслойных сотовых панелей данного состава в качестве панелей пола в пассажирской кабине, а также в качестве панелей пола, стен и потолка в багажно-грузовых отсеках.

Токсичность продуктов горения полимерных материалов в настоящее время в государственных авиационных нормах не регламентируется. Результаты испытаний на токсичность продуктов, выделяемых в процессе горения трехслойных сотовых конструкций панелей пола, показали соответствие требованиям, установленным ведущими мировыми авиастроительными корпорациями (Boeing, Airbus, Bombardier).

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2025-011 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04 июля 2023 г. об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.

2. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. Т. 10: Клеи, герметики, резины, гидрожидкости, ч. 1: Клеи, клеевые препреги, 2019. 276 с.
5. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.
6. Вольнов О.И., Дудукин Д.О. Стеклопластик. История развития, технология производства, формообразование деталей и современное применение // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5 (107). С. 400–404.
7. Курносов А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
8. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеевого связующего в препреге // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
9. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. The influence of the content of halogen-containing oligomer in the composition of VSK-14-6 adhesive binder on the kinetics of the curing process of prepregs on different fillers and a comparative analysis of the curing kinetics of prepregs based on VSK-14-1 adhesive binder // Polymer science. Series D. 2023. Vol. 16. No. 4. P. 882–891.
10. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
11. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. II. Молекулярная подвижность в сложных сшитых системах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
12. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
13. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Когтенков А.С. Новые разработки в области клеящих материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459.
14. Борщев А.В., Гусев Ю.А. Полимерные композиционные материалы в автомобильной промышленности // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
15. 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> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. 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.
17. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Клеевые препреги пониженной горючести, предназначенные для изготовления интегральных и трехслойных сотовых конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.

18. Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Углепластики в современном мире: их свойства и применения // *Успехи в химии и химической технологии*. 2019. Т. XXXIII. № 6. С. 62–64.
19. Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
20. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 2. Испытания на горючесть. Влияние продолжительности экспозиции пламенем горелки // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 3. С. 13–23.
21. Вредные вещества в промышленности: в 20 т. 5-е изд., стереотипное. М.–Л.: Химия, 1965. Т. 2. Неорганические и элементоорганические соединения. 620 с.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
3. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovations. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. *Aviation materials: handbook in 13 vols.* Ed. by E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, vol. 10: Adhesives, sealants, rubbers, hydraulic fluids, part 1: Adhesives, adhesive prepregs, 2019, 276 p.
5. Vavilova M.I., Kavun N.S. The properties of glass filler for constructions of fiberglass. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. 3, pp. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.
6. Volnov O.I., Dudukin D.O. Fiberglass. History of development, production technology, shaping of parts and modern application. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*, 2014, no. 5 (107), pp. 400–404.
7. Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I. Structural glass-reinforced plastics purposed for aviation industry. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
8. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
9. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. The influence of the content of halogen-containing oligomer in the composition of VSK-14-6 adhesive binder on the kinetics of the curing process of prepregs on different fillers and a comparative analysis of the curing kinetics of prepregs based on VSK-14-1 adhesive binder. *Polymer science. Series D*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 882–891.
10. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
11. Perov N.S. Design of polymeric materials on the molecular principles. II. The molecular mobility in the cross-linked complex systems. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
12. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
13. Lukina N.Ph., Petrova A.P., Muhametov R.R., Kogtenkov A.S. New developments in the field of adhesive aviation materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459.

14. Borshchev A.V., Gusev Yu.A. Polymer composite materials in automotive industry. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
15. 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> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F., Tyumeneva T.Yu. Adhesive prepregs as promising materials for parts and assemblies from polymeric composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
17. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Low-combustibility adhesive prepregs designed for the manufacture of integral and three-layer honeycomb structures aircraft technology. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
18. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon fiber reinforced plastics in the modern world: their properties and applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. XXXIII, no. 6, pp. 62–64.
19. Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
20. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyeenko O.A., Shurkova E.N. Features of testing aviation materials for fire hazard. Part 2. Combustibility tests. Effect of burner flame exposure duration. *Pozharovzryvbezopasnost*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 13–23.
21. *Harmful substances in industry*: in 20 vols. 5th ed., stereotyped. Moscow–Leningrad: Khimiya, 1965, vol. 2. Inorganic and organoelement compounds, 620 p.

Информация об авторах

Старков Алексей Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куцевич Кирилл Евгеньевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Исаев Алексей Юрьевич, заместитель начальника лаборатории по науке, 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

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexey I. Starkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill E. Kutsevich, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey Yu. Isaev, Deputy Head of Laboratory of Science, 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

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.01.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 29.01.2025.