

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-49-62

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЙ УГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

*М.С. Иванов<sup>1</sup>, В.А. Сагомонова<sup>1</sup>, В.С. Морозова<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** Проведен анализ информационных источников в области термопластичных полимерных композиционных материалов на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) для аэрокосмического применения. Сформулированы требования и представлены основные результаты по разработке препрега и термопластичного углепластика марки ВКУ-65 на основе отечественного тканого углеродного наполнителя и ПЭЭК-связующего. Описаны процессы изготовления препрега и углепластика, проведено исследование их основных свойств. Разработана технология переработки термопластичного углепластика методом термоформования.

**Ключевые слова:** полиэфирэфиркетон, углеродная ткань, термопластичный полимерный композиционный материал, термоформование, углепластик, препрег

**Для цитирования:** Иванов М.С., Сагомонова В.А., Морозова В.С. Отечественный термопластичный углепластик на основе полиэфирэфиркетона // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-49-62.

Scientific article

## DOMESTIC THERMOPLASTIC CARBON PLASTIC BASED ON POLYETHERETHERKETONE

*M.S. Ivanov<sup>1</sup>, V.A. Sagomonova<sup>1</sup>, V.S. Morozova<sup>1</sup>*

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

**Abstract.** The analysis of information sources in area of thermoplastic composite materials on the basis of polyetheretherketone (PEEK) for aerospace application is carried out. Requirements are formulated and the main results on development of prepreg and thermoplastic carbon plastic the VKU-65 brands on the basis of domestic woven carbon filler and PEEK binding are provided. Processes of manufacturing of prepreg and thermoplastic carbon plastic are described, research of their main properties is conducted. The refining technology of thermoplastic carbon plastic is developed by thermoforming method.

**Keywords:** polyetheretherketone, carbon fabric, thermoplastic composite material, thermoforming, carbon plastic, prepreg

**For citation:** Ivanov M.S., Sagomonova V.A., Morozova V.S. Domestic thermoplastic carbon plastic based on polyetheretherketone. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-49-62.

### Введение

Мировые тенденции развития авиа-, судо-, автомобилестроения и других отраслей промышленности направлены на увеличение доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в составе изделий и конструкций различных видов техники.

В мировой практике в качестве связующих для стекло- и углепластиков используются преимущественно термореактивные смолы. Основными недостатками таких материалов являются ограниченное время хранения полуфабрикатов, использование экологически опасных растворителей, значительная длительность и трудоемкость процесса изготовления изделий, а также повышенная пористость [1–3].

В связи с этим в авиастроении пристальное внимание уделяется ПКМ на основе термопластичной композиционной матрицы (ТПКМ), поскольку применение таких материалов обеспечивает практически неограниченный срок хранения препрегов, короткий экологичный и безопасный производственный цикл, возможность переработки отходов и ремонтпригодность изделий. Кроме того, ТПКМ обладают повышенной, в сравнении с ПКМ на основе термореактивного связующего, ударной вязкостью, стойкостью к атмосферно-климатическим факторам, огнестойкостью, сниженной токсичностью и газопроницаемостью [4–12].

К недостаткам этих материалов следует отнести высокую температуру переработки (более 350–400 °С), зависимость свойств от степени кристалличности матрицы и скорости охлаждения, а также низкую адгезионную способность многих термостойких термопластов.

Современные ТПКМ для авиации изготавливают преимущественно на основе термопластов нового поколения с повышенными прочностными свойствами и термостойкостью – полиэфирэфиркетона и его сополимеров, полифениленсульфидов, полиэфиримида и полисульфона, жидкокристаллических полимеров типа Vestra и смеси указанных полимеров [13–22]. Основными методами переработки ТПКМ в изделия в настоящее время являются термоформование (гибка, штамповка, вакуумное и пневмоформование), автоклавное формование и автоматическая выкладка.

Из ТПКМ изготавливают широкий спектр деталей для авиастроения, такие как элементы крыла, рули высоты и направления, элероны, киль, шпангоуты крыла, элементы фюзеляжа и др. Углепластики на основе полиэфиримидной матрицы используются при производстве деталей внутренней отделки салонов и грузовых отсеков космических орбитальных станций и пассажирских лайнеров. Из углепластика на основе полифениленсульфидного связующего изготавливают лобовики крыльев и зализы мотогондол всех аэробусов (от модели А-340-600 до модели А-380). Углепластики на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) применяют для изготовления конструкций, эксплуатируемых в открытом космосе [13, 18]. В составе двигателя ПД-35 планируется использовать более 10 деталей, изготовленных из ТПКМ (рис. 1).

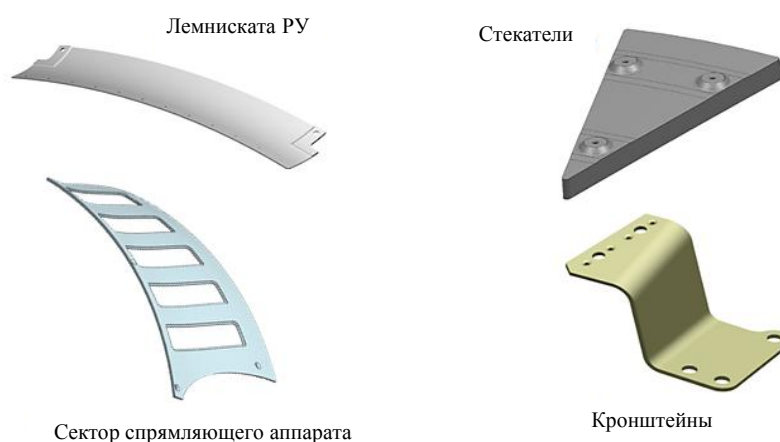


Рис. 1. Детали двигателя ПД-35, в которых планируется применение термопластичного углепластика

В частности, необходим ТПКМ с рабочей температурой до 150 °С на основе углеродной ткани саржевого или сатинового плетения и ПЭЭК-связующего для изготовления целого ряда элементов и агрегатов мотогондолы авиационного двигателя методом термоформования: секторов спрямляющего аппарата, створок реверсивного устройства, стекателей, лемнискат и кронштейнов реверсивного устройства и т. п. В настоящее время данные элементы производят из углепластиков на основе терморезистивного связующего, титановых или алюминиевых сплавов. Применение ТПКМ позволит снизить массу деталей мотогондолы не менее чем на 20 % по сравнению с деталями, выполненными из алюминиевых и титановых сплавов.

В настоящее время ТПКМ на основе ПЭЭК для авиации представлены на мировом рынке в основном марками, производимыми в США, Европе, Японии и Китае. В России наблюдается значительное отставание по этому направлению, связанное как с дефицитом исходных химических компонентов для ряда полимеров, так и с недостаточной готовностью предприятий промышленности к освоению производства и переработки ТПКМ в изделия и конструкции. Тем не менее предприятиями (изготовителями материалов и производителями изделий авиационной техники) ведется активное техническое перевооружение для обеспечения внедрения ТПКМ [3, 23–28].

Сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ поставлена задача – разработать новый отечественный ТПКМ на основе двунаправленного наполнителя и ПЭЭК-связующего для деталей мотогондолы авиационного двигателя. Для выполнения данной задачи проведен анализ свойств импортных ТПКМ на основе ПЭЭК для аэрокосмического применения производства компаний Toray Advanced Composites (Япония) и Teijin Carbon Europe GmbH (Германия). Свойства указанных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Свойства импортных термопластичных полимерных композиционных материалов (ТПКМ) на основе полиэфирэфиркетона**

Свойства	Значения свойств для ТПКМ марок	
	Cetex TC-1200 (компания Toray Advanced Composites, Япония) [29]	Tenax®-E TPCL PEEK- HTA40 (компания Teijin Carbon Europe GmbH, Германия) [30]
Связующее	Полиэфирэфиркетон	
Волокно/переплетение	T300JB/5HS	Tenax®-E HTA40 3K/5HS
Поверхностная плотность ткани, г/м <sup>2</sup>	280	285
Температура плавления/стеклования связующего, °С	343/143	
Толщина монослоя, мм	0,31	
Содержание связующего, %	42	
Плотность углепластика, г/см <sup>3</sup>	1,53	
Предел прочности/модуль упругости, МПа/ГПа, в направлении армирования [0°]:		
при растяжении	776/56,1	963/60
при сжатии	585/51,6	725/59
при изгибе	859/46,3	1166/64

В процессе эксплуатации детали мотогондолы авиационного двигателя испытывают воздействия окружающей среды:

- температур окружающего воздуха от –60 до +120 °С (кратковременно – до 150 °С);
- относительной влажности воздуха до 100 %;

– эксплуатационных жидкостей (воды, топлива, масел, противообледенительной и гидравлической жидкости).

В результате проведенного анализа сформированы требования к ТПКМ для изготовления деталей мотогондолы авиационного двигателя методом термоформования. Он должен быть изготовлен из отечественных компонентов, обеспечивать возможность термоформования склейки и сварки, быть устойчивым к различным эксплуатационным факторам и отвечать следующему комплексу характеристик:

- рабочая температура от  $-60$  до  $+120$  °С (кратковременно – до  $150$  °С);
- предел прочности при сжатии по основе  $\geq 600$  МПа;
- предел прочности при межслойном сдвиге на короткой балке  $\geq 35$  МПа;
- предел прочности при изгибе по основе  $\geq 850$  МПа;
- модуль упругости при изгибе  $\geq 30$  ГПа;
- предел прочности при растяжении по основе  $\geq 800$  МПа;
- модуль упругости при растяжении  $\geq 40$  ГПа;
- пористость углепластика  $\leq 3$  %.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

В связи со сложной геополитической обстановкой ТПКМ должны изготавливаться из отечественных материалов.

В качестве углеродного наполнителя применяли углеродную ткань саржевого плетения на основе волокна UMT42S-3K-EP или UMT40-3K-EP производства АО «Юматекс». Поверхностная плотность:  $200 \pm 10$  г/м<sup>2</sup>.

В качестве связующего использовали импортный порошкообразный полиэфирэфиркетон марки Zureek 330UPF производства КНР и отечественный марки ПЭЭК-50П производства АО «Институт пластмасс» (температура плавления – не менее  $340$  °С; температура стеклования – не менее  $143$  °С; показатель текучести расплава (ПТР):  $30$ – $120$  г/10 мин).

Изготовление препрега осуществляли методом электростатического напыления связующего на углеродную ткань с дальнейшим оплавлением связующего в термошкафу. Изготовление углепластика проводили по технологии прямого прессования или автоклавного формования.

Процесс получения углепластика выглядит следующим образом:

- раскрой препрега;
- сборка пакета для формования углепластика;
- формование углепластика;
- механическая обработка углепластика.

Испытания образцов по определению их характеристик проводили по следующим методикам:

- показатель текучести расплава – по ГОСТ 11645–73;
- фракционный состав порошка – по ГОСТ 18318–94;
- ультразвуковой контроль – по СТО 1-595-22-599–2020;
- дифференциальную сканирующую калориметрию – по ГОСТ Р 55135–2012 и ГОСТ Р 56757–2015;
- объемную плотность – по ГОСТ 15139–69;
- массовую долю связующего – по ГОСТ 56682–2015;

- предел прочности при растяжении – по ГОСТ Р 56785–2015;
- предел прочности при сжатии – по ГОСТ Р 33519–2015;
- предел прочности при изгибе – по ГОСТ Р 56805–2015;
- предел прочности при межслойном сдвиге – по ГОСТ 32659–2014;
- пористость методом металлографического анализа – по МИ 1.2.018–2010;
- горючесть и дымообразование – по АП-25 (Приложение F, Части 1 и 5);
- влагопоглощение – по ГОСТ 12020–2018;
- тепловой ресурс – по СТО 1-595-20-101–2016.

Исследование поверхностей разрушения проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 10 и 200 пА. Получены микрофотографии поверхностей разрушения в режиме вторичных электронов при увеличениях от  $\times 50$  до  $\times 20000$ .

### Результаты и обсуждение

В соответствии с предъявляемыми требованиями в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан термопластичный углепластик для изготовления деталей мотогондолы авиационного двигателя.

На первом этапе работа была направлена на разработку технологии изготовления препрега углепластика на основе выбранных компонентов.

Способность ПЭЭК к переработке оценивали по величине ПТР по ГОСТ 11645–73 при нагрузке 5 кг, температуре 380 °С и диаметре капилляра 2,095 мм. По результатам испытаний установлено, что ПТР полиэфирэфиркетона марки Zureek 330UPF составляет 38 г/10 мин, а марки ПЭЭК-50П: 96 г/10 мин, что в соответствии с исследованиями [30, 31] должно обеспечить хорошую пропитку наполнителя при формовании термопластичного углепластика.

Методом просеивания через ситы с ячейками размером 500, 200, 100 мкм на просеивающей машине AS 300 определен фракционный состав ПЭЭК в соответствии с ГОСТ 18318–94. По результатам испытаний установлено, что  $>90$  % частиц обоих порошков имеют размер в пределах от 100 до 500 мкм, при этом самая мелкая фракция в количестве 2,5 % образует агломераты на сите с ячейками размером 500 мкм. Данную фракцию необходимо удалять, так как при нанесении порошка методом электростатического напыления данные агломераты попадают в сопло пистолета для напыления, что приводит к его закупорке и многократному увеличению трудоемкости нанесения порошка на углеродную ткань.

Исходя из типового объемного содержания наполнителя в углепластиках конструкционного назначения ( $\sim 50$  %), массового содержания связующего импортных материалов-аналогов (42 %) и результатов предыдущих исследований [31, 32] определено оптимальное содержание связующего в препреге:  $42 \pm 5$  % (по массе). Потери связующего при нанесении методом электростатического напыления составляют 10 %.

Волокно UMT-42S-3K-EP, из которого изготовили выбранную углеродную ткань, обработали эпоксидным аппретом. Для повышения межфазного взаимодействия «ПЭЭК–углеродное волокно» углеродную ткань подвергали термообработке при температурах  $>250$  °С [31, 33].

Методом электростатического напыления ПЭЭК-связующего с оптимальным фракционным составом поочередно на обе стороны углеродной ткани саржевого плетения с дальнейшим оплавлением связующего в термошкафу при температуре на 30–50 °С больше температуры плавления связующего изготовлены образцы препрегов и проведено исследование их свойств [34]. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

**Результаты определения основных свойств  
экспериментальных образцов термопластичных углепрепрегов**

Пребрег на основе связующего	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Содержание связующего, % (по массе)
РЕЕК 330 UPF	0,29	328	39
ПЭЭК-50П	0,24	339	41

Результаты определения содержания связующего в пребрегах, изготовленных по выбранным режимам, показали, что оба состава пригодны для дальнейших исследований.

Проведена проверка технологичности пребрегов выбранных составов. С этой целью изготовлены плиты углепластика методом формования в прессе, проведен их ультразвуковой контроль и физико-механические испытания. Результаты представлены на рис. 2 и в табл. 3.

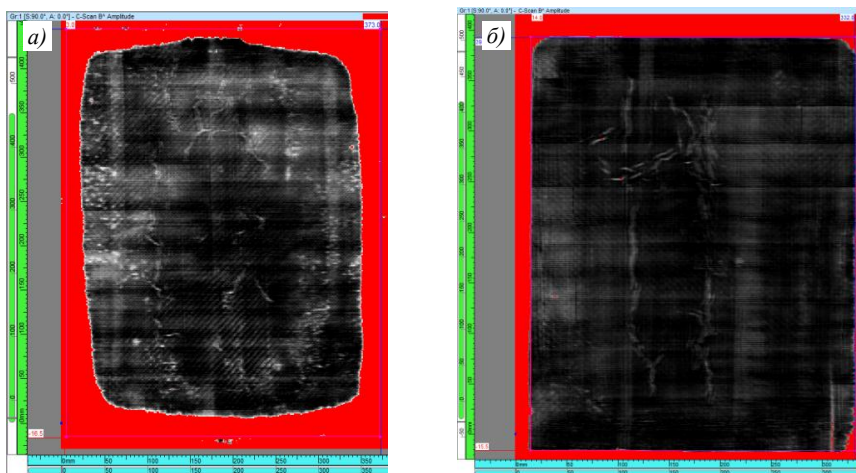


Рис. 2. С-сканы по донному эхо-сигналу экспериментальных образцов термопластичного углепластика со связующим марок РЕЕК 330 UPF (а) и ПЭЭК-50П (б)

**Результаты определения физико-механических свойств  
экспериментальных образцов термопластичных углепластиков**

Свойства	Значения свойств для связующего	
	РЕЕК 330 UPF	ПЭЭК-50П
Предел прочности при растяжении, МПа (ГОСТ 25.601–80)	806	879
Предел прочности при сжатии, МПа (ГОСТ 25.602–80)	534	608
Предел прочности при изгибе, МПа (ГОСТ 25.604–82)	942	1002
Предел прочности при межслойном сдвиге на короткой балке, МПа (ГОСТ 32659–2014)	81	87

По результатам ультразвукового контроля «нормальная зона» (черный и серый цвет) занимает большую часть поверхности образцов, что свидетельствует об отсутствии расслоений, пористости и других дефектов структуры углепластиков, а дефектные области (красный цвет) сосредоточены по краям и в углах плит. Однако обнаружена недостаточная степень пропитки (~70 %) углепластика связующим РЕЕК 330 UPF, что обусловлено его низким ПТР. Степень пропитки углепластика связующим ПЭЭК-50П составляет 99 %.

По результатам исследования физико-механических свойств также обнаружено, что углепластик на основе связующего ПЭЭК-50П имеет преимущество по значениям характеристик не менее 5 %. Поэтому для дальнейших исследований выбран состав препрега на основе углеродной ткани саржевого плетения и связующего ПЭЭК-50П. Разработанному составу углепластика присвоена марка ВКУ-65.

Проведен фрактографический анализ методом растровой электронной микроскопии (изломов) образцов из углепластика после испытаний на изгиб.

На рис. 3 представлено микростроение излома в зоне жгутов волокон, расположенных параллельно макроплоскости магистральной трещины. Микрорельеф разрушения по полимерной матрице (рис. 3, а) является типичным для термопластичных полимеров с характерными признаками кавитационных явлений и формирования тяжей в матрице. Участков разрушения по границе раздела «волокно–матрица» не выявлено, волокна покрыты слоем полимерной матрицы (рис. 3, б, в).

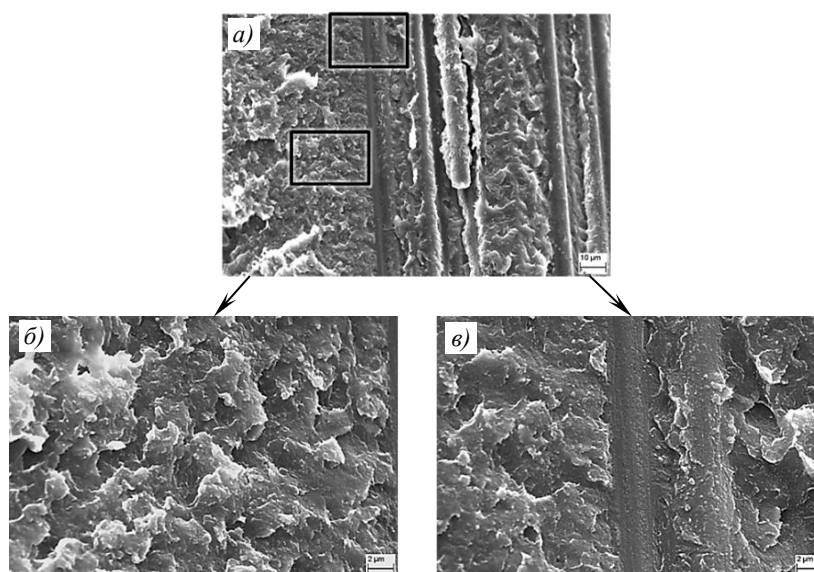


Рис. 3. Микростроение излома (а –  $\times 2000$ ; б, в –  $\times 10000$ ) в зоне жгутов волокон, расположенных параллельно макроплоскости магистральной трещины

Анализ результатов микростроения излома свидетельствует о хорошей адгезии между предварительно термообработанным углеродным наполнителем и термопластичной ПЭЭК-матрицей.

На технологию изготовления препрега разработана технологическая инструкция с литерой «О», а на поставку – технические условия ТУ 1-595-9-1909–2020 «Препрег углепластика марки ВКУ-65».

На следующем этапе провели разработку технологии изготовления углепластика. Формование плит углепластика осуществляли в зависимости от требуемых размеров (до  $450 \times 450$  мм – методом прямого прессования в прессе ПКМВ-65 [34], до  $800 \times 600$  мм – методом автоклавного формования) в высокотемпературном автоклаве ITALMATIC с азотной станцией, обеспечивающей давление не менее 20 МПа и максимальную температуру нагрева не менее  $400$  °С.

Физико-механические свойства исследовали на образцах, вырезанных из плит углепластиков (укладка  $[0]_{10}$ , ориентация  $[0]$ ), отформованных из препрега марки ВКУ-65 в прессе и автоклаве по выбранным технологическим режимам. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

## Результаты испытаний образцов углепластика из препрега марки ВКУ-65

Свойства	Значения свойств* при формовании	
	в прессе	в автоклаве
Плотность, кг/м <sup>3</sup> (ГОСТ 15139–69)	<u>1,48–1,55</u> 1,51	
Содержание связующего, % (по массе) (ГОСТ 56682–2015)	<u>39–45</u> 43	
Температура стеклования, °С (ГОСТ Р 55135–2012)	142–144	
Предел прочности при растяжении, МПа (ГОСТ 56785–2015)	<u>830–890</u> 858	<u>840–870</u> 850
Модуль упругости при растяжении, ГПа (ГОСТ 56785–2015)	<u>53–64</u> 59	<u>45–59</u> 55
Предел прочности при сжатии, МПа (ГОСТ 33519–2015)	<u>710–780</u> 756	<u>620–680</u> 646
Предел прочности при изгибе, МПа (ГОСТ Р 56805–2015)	<u>880–920</u> 900	<u>810–920</u> 862
Модуль упругости при изгибе, ГПа (ГОСТ Р 56805–2015)	<u>51–55</u> 53	<u>49–54</u> 51
Предел прочности при межслойном сдвиге на короткой балке, МПа (ГОСТ 32659–2014)	<u>55–85</u> 69	<u>59–64</u> 62
Содержание пор, % (МИ 1.2.018–2010)	Не обнаружено	

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Исследование показало соответствие свойств образцов из ТПКМ, изготовленных и в прессе, и в автоклаве, предъявляемым требованиям. Температура стеклования связующего 142 °С должна обеспечить работоспособность углепластика при температуре 120 °С (кратковременно – до 150 °С).

Проведено исследование влияния теплового воздействия при температуре испытания 120 °С в течение 500 и 1000 ч и при температуре 150 °С в течение 250 ч на предел прочности при изгибе при температуре испытания 20 °С углепластика, изготовленного методом прессования. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

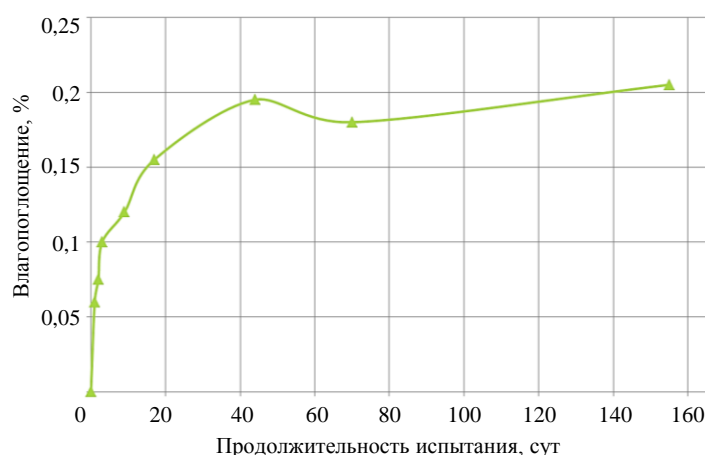
Предел прочности при изгибе углепластика марки ВКУ-65  
при температуре 20 °С после теплового воздействия

Свойство	в исходном состоянии	Значения свойства*		
		после воздействия температуры, °С, в течение, ч		
		150/250	120/500	120/1000
Предел прочности при изгибе, МПа (по ГОСТ Р 56805–2015)	<u>880–920</u> 900	<u>860–930</u> 896	<u>880–930</u> 912	<u>920–960</u> 944

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Установлено, что воздействие температуры не оказало влияния на предел прочности при изгибе образцов из листового углепластика марки ВКУ-65.

Определено, что влагопоглощение образцов из углепластика (рис. 4) в течение 155 сут при  $\phi = 98\%$  составляет не более 0,205 %.

Рис. 4. Влагопоглощение образцов из углепластика марки ВКУ-65 при  $\phi = 98\%$ 

Определены горючесть и дымообразование образцов из углепластика марки ВКУ-65 по АП-25 (Приложение F, Части 1 и 5). Установлено, что все образцы являются трудносгорающими (время остаточного горения – 0 с) и слабодымящими.

На технологию изготовления углепластика разработана технологическая инструкция с литерой «О», а на поставку – технические условия ТУ 1-595-9-1944–2021 «Листовой углепластик марки ВКУ-65».

По разработанной технологии изготовлена опытная партия углепластика марки ВКУ-65 и проведено исследование свойств. Результаты испытаний и сравнение с аналогом представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты предварительных испытаний опытной партии  
листового углепластика марки ВКУ-65**

Свойства	Значения свойств* для	
	углепластика ВКУ-65 (опытная партия)	зарубежного аналога Cetex TC1200 (компания Toqay)
Содержание связующего, % (по массе) (ГОСТ 56682–2015)	$\frac{41-45}{43}$	42
Толщина монослоя, мм	$0,22 \pm 0,02$	0,31
Плотность, г/см <sup>3</sup> (ГОСТ 15139–69)	$\frac{1,50-1,54}{1,52}$	1,53
Температура стеклования полимерной матрицы, °С (ГОСТ Р 55135–2012)	144	143
Предел прочности при растяжении, МПа (ГОСТ 56785–2015)	$\frac{800-850}{832}$	700
Модуль упругости при растяжении, ГПа (ГОСТ 56785–2015)	$\frac{62-66}{64}$	56,1
Предел прочности при сжатии, МПа (ГОСТ 33519–2015)	$\frac{580-680}{634}$	585
Предел прочности при изгибе, МПа (ГОСТ Р 56805–2015)	$\frac{970-1020}{990}$	859
Модуль упругости при изгибе, ГПа (ГОСТ Р 56805–2015)	$\frac{58-63}{61}$	46,3
Предел прочности при межслойном сдвиге на короткой балке, МПа (ГОСТ 32659–2014)	$\frac{59-65}{62}$	–
Содержание пор, % (МИ 1.2.018–2010)	Не более 0,9	–

\* В числителе – минимальное и максимальные значения, в знаменателе – среднее.

По результатам испытаний установлено, что отечественный углепластик марки ВКУ-65 не уступает по физико-механическим свойствам импортному аналогу производства компании Тогау; поверхностная плотность отечественного углеродного наполнителя на 30 % меньше импортного.

Для изготовления деталей из листового углепластика марки ВКУ-65 разработана технология термоформования.

Углепластик марки ВКУ-65 является ТПКМ, который при нагревании размягчается, а при охлаждении возвращается в исходное твердое состояние. Это свойство используют при изготовлении деталей различных форм.

Формование заготовок деталей из углепластика ВКУ-65 проводили методом контактного термоформования в прессе, снабженном узлом ИК-нагрева при температурах 350–400 °С с применением подогреваемой формующей оснастки, состоящей из матрицы и пуансона.

Технологический процесс термоформования состоит из следующих основных операций:

- подготовка оборудования и оснастки;
- подготовка листового углепластика;
- сборка пакета для термоформования;
- процесс формования (нагрев заготовки и ее формование в прессе).

Весь процесс в зависимости от толщины заготовки занимает не более 30 мин.

Для определения влияния режимов термоформования на качество заготовки детали проведено сравнение свойств исходного углепластика и отформованной заготовки детали. Результаты исследований представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Сравнение свойств исходного углепластика ВКУ-65 и отформованной заготовки конструктивно-подобного образца (КПО)**

Свойства	Значения свойств для	
	исходного углепластика ВКУ-65	заготовки КПО из углепластика ВКУ-65
Температура стеклования, °С (ГОСТ Р 55135–2012)	140	165
Массовая доля связующего, % (ГОСТ Р 56682–2015)	42	42
Степень кристалличности, % (ГОСТ Р 56757–2015)	41	35
Содержание пор, % (МИ 1.2.018–2010)	0,09	0,08
Предел прочности при межслойном сдвиге на короткой балке, МПа (ГОСТ 32659–2014)	74	98
Плотность, г/см <sup>3</sup> (ГОСТ 15139–69)	1,53	1,5

Результаты исследования заготовки детали показали, что после термоформования происходит повышение температуры стеклования полимерной матрицы на 15 % и снижение степени кристалличности на 15 % по сравнению со значениями исходного углепластика. Дефекты внешнего вида и внутренние дефекты не обнаружены, объемная доля пор составляет не более 0,09 %.

По разработанной технологии изготовлен конструктивно-подобный образец элемента мотогондолы – кронштейн реверсивного устройства двигателя ПД-14 (рис. 5). При этом масса данного кронштейна из сплава ОТ4 составляет 12 г, а из листового углепластика марки ВКУ-65: 3 г. Экономия по массе составляет 75 %. Количество таких кронштейнов на двигателе: 40 шт. Общее снижение массы двигателя составляет 360 г. При этом предел прочности при растяжении листового углепластика марки ВКУ-65 (832 МПа) не уступает пределу прочности при растяжении сплава ОТ4 (800 МПа). По результатам ультразвукового контроля установлено, что дефектов внутренней структуры конструктивно-подобного образца, в том числе в зоне перегиба, не обнаружено.



Рис. 5. Конструктивно-подобный образец элемента мотогондолы – кронштейн из листового углепластика ВКУ-65

### Заключения

Проведен анализ информационных источников в области ПКМ на основе термопластичной матрицы, в том числе на основе ПЭЭК-связующих. В результате сформулированы требования к разрабатываемому отечественному ТПКМ.

Исследования по разработке препрега для изготовления ТПКМ показали, что наилучший комплекс свойств имеет препрег, полученный на основе углеткани саржевого плетения на основе волокна UMT-42S-3K-EP с двусторонним покрытием связующим марки ПЭЭК-50П. Материалу присвоена марка ВКУ-65.

Разработана технология получения углепластика методами прессового и автоклавного формования и изготовлена его опытная партия. Исследование его характеристик показало, что свойства углепластика соответствуют предъявляемым требованиям и свойствам импортного аналога производства компании Toray. Материал имеет рабочую температуру 120 °С (кратковременно – до 150 °С), является пожаробезопасным и имеет низкое влагопоглощение.

Разработана технология термоформования углепластика. По данной технологии изготовлен конструктивно-подобный образец элемента мотогондолы – кронштейн реверсивного устройства двигателя ПД-14.

На основании полученных результатов проводятся дальнейшие исследования и опробование углепластика в рамках НИР с двигателестроительным предприятием и в рамках общей квалификации.

### Список источников

1. 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.
2. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике // *Полимерные материалы*. 2009. № 2. С. 5–9.
3. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
4. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 30–40.
5. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 4 (45). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-60-67.
6. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 8. С. 277–286.
7. Головкин Г.С. Регулирование механических свойств ПКМ методами целенаправленного формирования межфазной зоны // *Полимерные материалы*. 2009. № 11. С. 26–28.

8. Гуняева А.Г., Вешкин Е.А., Антюфеева Н.В., Панафидникова А.Н., Ефимик В.А. Исследование влияния конденсационной влаги на препрег углепластика на основе растворного эпоксидного связующего и ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-80-88.
9. Кирин Б.С., Кузнецова К.Р., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетонов отечественного и зарубежного производства // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43.
10. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натуральных климатических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3 (42). С. 66–72. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-66-72.
11. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Сорокин А.Е., Сапего Ю.А. Современные способы переработки термопластов // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7.
12. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Липкость и возможность использования препрегов для автоматизированных технологий (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
13. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе. СПб.: Профессия, 2006. 346 с.
14. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
15. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
16. Николаев А.Ф. Термостойкие полимеры. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1988. С. 3–11.
17. Головкин Г.С. Технологические свойства термопластичных связующих для армированных пластиков // Пластические массы. 2005. № 1. С. 35–40.
18. Мажирын П.Ю. Полифениленсульфид в авиастроении // Полимерные материалы. 2003. № 2. С. 22–24.
19. Li J. Effect of silane coupling agent on the tensile properties of carbon fiber-reinforced thermoplastic polyimide // Composites. A: Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2010. Vol. 49. P. 337–340.
20. Тростянская Е.Б., Степанова М.И., Рассохин Г.И. Теплостойкие линейные полимеры. Ростов н/Д: РГАСХМ, 2002. С. 3–22.
21. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. № 3. С. 8–13.
22. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic Materials Science: Current State and Prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87. No. 5. P. 397–408.
23. Лазарева Т.К., Ермакин С.Н., Костягина В.А. Проблемы создания композиционных материалов на основе конструкционных термопластов // Успехи в химии и химической технологии. 2010. Т. 24. № 4. С. 58–63.
24. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
25. Jones Fr. A review of interphase formation and design in fibre-reinforced composites // Journal of Adhesion Science and Technology. 2010. Vol. 24. No. 1. P. 171–202.
26. Drzal Lt., Raghavendran Vk. Adhesion of thermoplastic matrices to carbon fibers: effect of polymer molecular weight and fiber surface chemistry // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2003. Vol. 16. P. 21–30.
27. Thostenson E.T., Chou T.-W. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization // Journal of Physics. D: Applied Physics. 2002. Vol. 35. P. L77–L80.
28. Chuang L., Chu N.-J. Effect of polyamic acids on interfacial shear strength in carbon fiber/aromatic thermoplastics // Journal of Applied Polymer Science. 1990. Vol. 41. P. 373–382.
29. Datasheet Cetex-1200: офиц. сайт. URL: [www.toraytac.com](http://www.toraytac.com) (дата обращения: 20.05.2022).
30. Datasheet Tenax®-E TPCL PEEK-HTA40: офиц. сайт. URL: [www.teijin-carbon.com](http://www.teijin-carbon.com) (дата обращения: 20.05.2022).

31. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
32. Кирич Б.С., Сорокин А.Е., Бойчук А.С. Углепластики на основе полиэфирэфиркетонов // *Труды ВИАМ*. 2020. № 4–5 (88). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-22-31.
33. A kind of method of carbon fiber surface modification: pat. CN108642882A No. CN201810435940; filed 09.05.18; publ. 12.10.18.
34. Способ изготовления углепластика на основе тканого углеродного наполнителя и термопластичного связующего: пат. 2765042 Рос. Федерация. № 2020135999; заявл. 02.11.20; опубл. 25.01.22.

### References

1. 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.
2. Komarov G.A. The state, prospects and problems of the use of PKM in technology. *Polimernye materialy*, 2009, no. 2, pp. 5–9.
3. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*. St. Petersburg: Professiya, 2011, pp. 32–33.
4. Petrova G.N., Bader E.Ya. Structural materials based on reinforced thermoplasts. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 30–40.
5. Kraev I.D., Shuldeshov E.M., Platonov M.M., Yurkov G.Yu. Composite materials combining acoustic and radio shielding properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 4 (45), pp. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-60-67.
6. Gunyaev G.M., Chursova L.V., Komarova O.A., Gunyaeva A.G. Constructional carbon the plastics modified by nanoparticles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 277–286.
7. Golovkin G.S. The regulation of the mechanical properties of PCM by the methods of targeted formation of the interference zone. *Polimernye materialy*, 2009, no. 11, pp. 26–28.
8. Gunyaeva A.G., Veshkin E.A., Antyufeeva N.V., Panafidnikova A.N., Efimik V.A. Research of influence of the condensation moisture on carbon fiber plastic prepreg on the basis of solution epoxy binder and PCM on its basis. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-80-88.
9. Kirin B.S., Kuznetsova K.R., Petrova G.N., Sorokin A.E. Comparative analysis of properties of polyetheretherketones of domestic and foreign production. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43.
10. Sorokin A.E., Bejder E.Ya., Izotova T.F., Nikolaev E.V., Shvedkova A.K. Investigation of carbon fiber reinforced plastic on polyphenylenesulfide resin after accelerated and natural climatic test. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 3 (42), pp. 66–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-66-72.
11. Petrova G.N., Larionov S.A., Sorokin A.E., Sapego Yu.A. Modern ways of processing of thermoplastics. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7.
12. Timoshkov P.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Stickiness and possibility of using prepreps for automated technologies (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
13. Mikhailin Yu.A. *Thermal-resistant polymers and polymer materials based on them*. St. Petersburg: Professiya, 2006, 346 p.
14. Kablov E.N. *Trends and guidelines of innovative development of Russia: collection scientific-inform. materials*. 3rd ed. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
15. Kablov E.N. What to make the future from? The materials of the new generation, the technology of their creation and processing are the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
16. Nikolaev A.F. *Heat-resistant polymers*. Leningrad: Lensovet LTI, 1988, pp. 3–11.

17. Golovkin G.S. Technological properties of thermoplastic binders for reinforced plastics. *Plasticheskie massy*, 2005, no. 1, pp. 35–40.
18. Mazhirin P.Yu. Polyphenylene sulfide in aircraft industry. *Polimernye materialy*, 2003, no. 2, pp. 22–24.
19. Li J. Effect of Silane Coupling Agent on the Tensile Properties of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Polyimide. *Composites. A: Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2010, vol. 49, pp. 337–340.
20. Trostyanskaya E.B., Stepanova M.I., Rosokhin G.I. *Heat-resistant linear polymers*. Rostov-on-Don: RGASKhM, 2002, pp. 3–22.
21. Kablov E.N. Russia needs new generation materials. *Redkiye zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
22. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic Materials Science: Current State and Prospects. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 87, no. 5, pp. 397–408.
23. Lazareva T.K., Ermakin S.N., Kostyagina V.A. Problems of creating composite materials based on structural thermoplasts. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2010, vol. 24, no. 4, pp. 58–63.
24. Kablov E.N. Aerospace materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
25. Jones Fr. A Review of Interphase Formation and Design in Fibre-Reinforced Composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, vol. 24, no. 1, pp. 171–202.
26. Drzal Lt., Raghavedran Vk. Adhesion of Thermoplastic Matrices to Carbon Fibers: Effect of Polymer Molecular Weight and Fiber Surface Chemistry. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2003, vol. 16, pp. 21–30.
27. Thostenson E.T., Chou T.-W. Aligned Multi-Walled Carbon Nanotube-Reinforced Composites: Processing and Mechanical Characterization. *Journal of Physics. D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, pp. L77–L80.
28. Chuang L., Chu N.-J. Effect of Polyamic Acids on Interface SHEAR Strength In Carbon Fiber/Aromatic Thermoplastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 1990, vol. 41, pp. 373–382.
29. *Datasheet Setex-1200*. Available at: [www.toraytac.com](http://www.toraytac.com) (accessed: May 05, 2022).
30. *Datasheet Tenax®-E TPCL Peek-HTA40*. Available at: [www.teijinacarbon.com](http://www.teijinacarbon.com) (accessed: May 05, 2022).
31. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
32. Kirin B.S., Sorokin A.E., Boychuk A.S. Carbon fiber reinforced thermoplastic on the basis of polyetheretherketones. *Trudy VIAM*, 2020, no. 4–5 (88), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-22-31.
33. *A Kind of Method of Carbon Fiber Surface Modification*: pat. CN108642882A, no. CN201810435940; filed 09.05.18; publ. 12.10.18.
34. *The method of manufacturing carbon fiber based on woven carbon filler and thermoplastic binding*: pat. 2765042 Rus. Federation, no. 2020135999; filed 02.11.20; publ. 25.01.22.

**Информация об авторах**

**Иванов Михаил Сергеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Сагомонова Валерия Андреевна**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Морозова Вероника Сергеевна**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Mikhail S. Ivanov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Valeria A. Sagomonova**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Veronica S. Morozova**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 03.08.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.08.2022.  
The article was submitted 03.08.2021; approved and accepted for publication after reviewing 04.08.2022.