

УДК 678

А.Г. Гуняева¹, А.И. Сидорина¹, О.Н. Клименко¹

ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНОГО АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ: СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-30-39

Приведено описание гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя, представлены результаты определения его свойств. В качестве объекта для исследования рассмотрен углепластик на основе гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.280М и эпоксидного расплавленного связующего. Изготовлены экспериментальные образцы препрегов углепластиков на основе эпоксидного расплавленного связующего и двух типов наполнителей: гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.280М и углеродного равнопрочного наполнителя марки ВТкУ-2.200. Исследованы свойства препрегов и углепластиков, проведен сравнительный анализ полученных результатов. Рассмотрены возможные варианты применения гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя и ПКМ на его основе.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, эпоксидное полимерное связующее, гибридный металлоуглеродный армирующий наполнитель, механические свойства, применение.

A.G. Gunyaeva¹, A.I. Sidorina¹, O.N. Klimenko¹

POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF THE HYBRID METALCARBON REINFORCING FILLER: PROPERTIES AND APPLICATION

The description of hybrid metalcarbon reinforcing filler is provided, results of determination of its properties are provided. As object for research it is considered CFRP on the basis of hybrid metalcarbon reinforcing filler of the VTkU-2.280M brand and the epoxy molten binding. Experimental samples of prepregs CFRP on the basis of epoxy molten binding and two types of fillers are made: hybrid metalcarbon reinforcing filler of the VTkU-2.280M brand and carbon equal strength filler of the VTkU-2.200 brand, properties of prepregs and CFRP are investigated, the comparative analysis of the received results is carried out. Possible options of application of hybrid metalcarbon reinforcing filler and PKM on its basis are considered.

Keywords: polymeric composite materials, epoxy polymeric binding, hybrid metalcarbon reinforcing filler, mechanical properties, application.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) к настоящему времени стали одними из основных конструкционных и функциональных материалов для применения в таких областях промышленности, как авиационная, ракетно-космическая техника, строительство, машиностроение, судостроение и др. [1]. В соответствии с ростом объемов применения повышаются и требования к свойствам ПКМ.

Современные ПКМ представляют собой сочетание различных компонентов, основные из которых – армирующий наполнитель и полимерное связующее. Именно состав и межфазное взаимодействие на границе раздела между этими компонентами имеют решающее значение при получении монолитного ПКМ. Следует также учитывать, что степень реализации свойств конечного композита при его эксплуатации напрямую зависит от правильно подобранных армирующего наполнителя и полимерного связующего. Использование различных технологических приемов позволяет оптимизировать текстильную структуру армирующего наполнителя [2], расположив волокна в матрице (полимерном связующем) композиционного материала таким образом, чтобы добиться наиболее полной реализации преимуществ составляющих его компонентов.

В настоящее время среди ПКМ, применяемых в наукоемких отраслях промышленности, наибольший объем потребления приходится на долю углепластиков – полимерных композитов на основе углеродных армирующих наполнителей различных текстильных форм (жгуты, ткани, ленты, штапельное волокно, 3D-формы и т. д.) [3], пропитанных полимерными связующими различной природы. Наибольшее распространение для применения в авиационной отрасли получили двунаправленные ткани с различными типами плетения (полотно, саржа, сатин, атлас и др.) [4]. При разработке технологии изготовления тканей [5] в качестве сырья применяются углеродные жгуты с различным количеством филаментов (различной линейной плотности) с комплексом физических и упруго-прочностных свойств, позволяющим получить необходимые свойства углепластиков с учетом особенностей применения готового изделия [6]. Углеродные волокна обладают уникальным набором технических характеристик и эксплуатационных свойств: механической прочностью при низкой плотности, устойчивостью к воздействию высоких температур, высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, хорошими теплоизоляционными свойствами, проводимостью, химической инертностью при неплохих адсорбирующих свойствах. Совокупность этих свойств сверхлегкого углеродного волокна объясняет его ценность и незаменимость во многих отраслях промышленности [7]. Жесткие углеродные волокна воспринимают основные напряжения, возникающие в материале при нагружении, придавая ему повышенные показатели предела прочности и жесткости в направлении ориентации волокон. Уровень прочностных и деформационных характеристик композиционных материалов [8] при условии совместимости армирующих волокон с матрицей определяется свойствами упрочняющих волокон, их размерами, ориентацией и содержанием в композите.

Создание новых уникальных армирующих наполнителей на основе углеродных волокон является актуальной научно-технической задачей [9] и ее успешное решение позволит расширить ассортимент тканых армирующих наполнителей, обладающих свойствами, необходимыми для применения углепластиков на их основе в авиакосмической, а также других отраслях российской промышленности, где ПКМ эксплуатируются в экстремальных условиях.

Для расширения ассортимента углеродных армирующих наполнителей для производства ПКМ на российском рынке во ФГУП «ВИАМ» разработан отечественный гибридный металлоуглеродный армирующий наполнитель из углеродного волокна с вплетенной в его структуру медной проволокой и проведены исследования ПКМ на основе нового наполнителя. Данная ткань является аналогом зарубежной углеродной ткани саржевого переплетения марки Tenax-E DRWF HTA403K-LSP-TW-200 производства компании Teijin Carbon. По требованию заказчика возможно изготовление и производство на мощностях ФГУП «ВИАМ» углеродных наполнителей с вплетенной в структуру медной проволокой различных номиналов (от 0,10 до 0,15 мм) и, соответственно, с различной поверхностной плотностью наполнителя.

Основной идеей при разработке гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя являлось рассмотрение возможности и эффективности его применения для

увеличения электропроводимости ПКМ [10], экранирования двигателей и систем радаров, а также возможное применение в дизайне интерьеров.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

Материалы и методы

Исследования и анализ проводили на экспериментальных образцах препрега и углепластика на основе гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.280М (ТУ1-595-11-1798–2019) производства ФГУП «ВИАМ» и эпоксидного расплавного связующего.

Гибридный металлоуглеродный армирующий наполнитель марки ВТкУ-2.280М представляет собой углеродную ткань саржевого плетения из углеродного волокна марки SYT45 3К (производства КНР) с вплетенной в структуру медной мягкой луженой (ММЛ) проволокой толщиной 0,1 мм производства РФ (ТУ16-505.850–75) (рис. 1).



Рис. 1. Гибридный металлоуглеродный армирующий наполнитель марки ВТкУ-2.280М

Основные свойства гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.280М приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.280М

Нити по основе и утку	Поверхностная плотность, г/м ²	Переплетение	Количество нитей на 10 см по основе/утку, шт.		Ширина ткани, мм
			углеродные жгуты 3К	проволока ММЛ-0,1	
Углеродные жгуты 3К и проволока ММЛ-0,1	280±15	Саржа 2/2	50/50	50/50	1000±10

Для проведения исследований взято эпоксидное расплавленное связующее на основе модифицированной дифункциональной эпоксидной смолы, полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя и термопласта. Данное связующее характеризуется высокими значениями вязкости разрушения, температурой стеклования – не менее 160 °С, рабочей температурой – не менее 120 °С. Полимерные композиционные материалы на основе эпоксидного расплавленного связующего могут быть переработаны методами прессования, вакуумного и автоклавного формования.

Для оценки влияния вплетенной в структуру углеродного армирующего наполнителя ММЛ проволоки на свойства препрега и углепластика проведено сравнение полученных результатов со свойствами углепластика на основе углеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.200 (ТУ1-595-11-1615–2016) производства ФГУП «ВИАМ» и упомянутого ранее эпоксидного расплавленного связующего.

Основные свойства углеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.200 (рис. 2) приведены в табл. 2.



Рис. 2. Углеродный армирующий наполнитель марки ВТкУ-2.200

Таблица 2

Свойства углеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.200

Нити по основе и утку	Поверхностная плотность, г/м ²	Переплетение	Количество нитей на 10 см по основе/утку, шт.	Ширина ткани, мм
Углеродные жгуты 3К	200±10	Саржа 2/2	50/50	1000±10

В данной работе использовали следующие методы исследований:

- реакцию способность определяли в процессе отверждения на термоаналитическом комплексе швейцарской фирмы Mettler Toledo методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК);
- ширину и поверхностную плотность ткани определяли по ГОСТ 29104.1–91, количество нитей на 10 см в ткани – по ГОСТ 29104.3–91;
- физико-механические характеристики определяли по ASTM D792, ASTM D3171, ASTM D3039 и ASTM D6641.

Результаты и обсуждение

Для изготовления экспериментальных образцов препрегов изготовлена партия эпоксидного расплавленного связующего и исследованы его свойства (табл. 3).

Таблица 3

Свойства расплавленного эпоксидного связующего

Свойства	Значения свойств
Внешний вид	Высоковязкая масса светло-желтого цвета без механических включений
Время гелеобразования по гелтаймеру связующего при температуре 145±5 °С, мин	35
Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре 100±1 °С, Па·с	20
Температура стеклования, °С, по методу ТМА* (не менее)	175
* Термомеханический анализ.	

Температура стеклования связующего составляет 175 °С, что обеспечивает необходимый запас по сохранению исходных упруго-прочностных характеристик ПКМ при рабочей температуре 120 °С. Оптимальное значение вязкости связующего, необходимое для его использования при изготовлении препрега, составляет 8,8 Па·с

и достигается при температуре 100 ± 1 °С. Данный уровень вязкости обеспечивает «сплошность» пленки и гарантирует получение качественных препрегов и ПКМ на их основе с высоким уровнем физико-механических свойств.

Препрег на основе российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и расплавного эпоксидного связующего (композиция 1) и препрег на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 и расплавного эпоксидного связующего (композиция 2) изготовлены по расплавной технологии на устанвке Coatema BL-2800 во ФГУП «ВИАМ».

Препреги исследованы методом ДСК на реакционную способность [12] в процессе отверждения, результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения характеристических температур, теплового эффекта реакции отверждения и времени гелеобразования связующего в образцах экспериментальной партии препрега (композиция 1) в сравнении с применяемым препрегом (композиция 2)

Свойства	Значения свойств для препрега композиции	
	1	2
Температура начала активной реакции отверждения связующего в препреге (скорость нагрева 10 °С/мин), °С	171	170
Температура максимума пика отверждения связующего в препреге, °С	210	209
Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	99	98
Время гелеобразования связующего в препреге при температуре 150 ± 2 °С, мин	30	27

Полученные результаты по тепловому эффекту реакции отверждения и времени гелеобразования связующего [13] в образцах препрега (композиция 1) на основе российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и препрега (композиция 2) на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 подтвердили, что препреги можно перерабатывать по одному режиму формования. Вплетенная в структуру углеродного армирующего наполнителя ММЛ проволока толщиной 0,1 мм не оказывает влияния на реакционную способность в процессе отверждения препрега.

Из экспериментальной партии препрега на основе российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и препрега на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 по ступенчатому режиму методом автоклавно-вакуумного формования изготовлены плиты, из них вырезаны образцы и исследованы их физические свойства: плотность и толщина монослоя. Результаты приведены в табл. 5. Плиты (рис. 3) выложены из 13 слоев препрега с укладкой [0°].

Таблица 5

Физические характеристики образцов из углепластика на основе препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и расплавного эпоксидного связующего (композиция 1) в сравнении с препрегом на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 и расплавного эпоксидного связующего (композиция 2)

Свойства	Значения свойств для углепластика		
	на основе 13 слоев препрега (композиция 1)	на основе 12 слоев препрега (композиция 2) и 1 слоя препрега (композиция 1)	на основе 13 слоев препрега (композиция 2)
Плотность, г/см ³	1,82	1,60	1,57
Толщина монослоя, мм	0,24	0,20	0,20

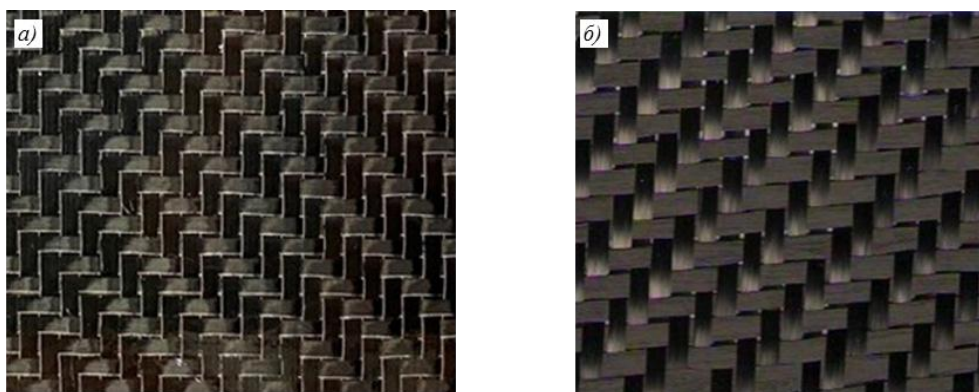


Рис. 3. Плиты из углепластиков на основе гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.280М (а) и углеродного армирующего наполнителя марки ВТкУ-2.200 (б)

Полученные результаты показывают, что вплетенная в структуру углеродного армирующего наполнителя ММЛ проволока толщиной 0,1 мм оказывает влияние на плотность отвержденного углепластика на основе препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М (композиция 1). Плотность материала с вплетенной в структуру углеродного армирующего наполнителя ММЛ проволокой возрастает на 8%. На толщину монослоя медная проволока также оказывает влияние – она увеличивается на 0,04 мм. Один слой препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М (композиция 1) в составе углепластика на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 (композиция 2) не оказывает влияния на его физические свойства.

Исследованы механические свойства углепластика на основе препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и расплавного эпоксидного связующего (композиция 1) и препрега на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 и расплавного эпоксидного связующего (композиция 2) – определены значения прочности при растяжении и сжатии в направлении приложения нагрузки $[0^\circ]$ при температурах 20 и 120 °С. Результаты приведены в табл. 6 и проведена их оценка.

Таблица 6

Механические характеристики образцов углепластика на основе препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и расплавного эпоксидного связующего (композиция 1) в сравнении с препрегом на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 и расплавного эпоксидного связующего (композиция 2)

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств* для углепластика		
		на основе 13 слоев препрега (композиция 1)	на основе 13 слоев препрега (композиция 2)	на основе 12 слоев препрега (композиция 2) и 1 слоя препрега (композиция 1)
Предел прочности при растяжении, МПа	20	<u>650–660</u> 655	<u>840–940</u> 890	<u>820–930</u> 860
	120	<u>500–540</u> 520	<u>730–900</u> 805	<u>720–870</u> 790
Предел прочности при сжатии, МПа	20	<u>500–520</u> 510	<u>680–770</u> 740	<u>700–760</u> 710
	120	<u>390–410</u> 400	<u>570–650</u> 600	<u>550–630</u> 590

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

По результатам проведенных исследований механических свойств образцов из углепластика на основе препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и расплавленного эпоксидного связующего (композиция 1) и углепластика на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 и расплавленного эпоксидного связующего (композиция 2) установлено, что вплетенная в структуру углеродного армирующего наполнителя ММЛ проволока толщиной 0,1 мм оказывает влияние на механические характеристики углепластика, что необходимо учитывать при определении области применения материала и воздействующих на материал нагрузок. Значения предела прочности при растяжении (по среднему значению) при 20 °С уменьшаются на 26%, предела прочности при сжатии (по среднему значению) при 20 °С – на 31%. Один слой препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М (композиция 1) в составе углепластика на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 (композиция 2) не оказывает влияния на его механические свойства.

Перспективы применения

Важным фактором, который определяет перспективность применения ПКМ на основе углеродных волокон, является в первую очередь уникальность их характеристик в совокупности с технологичностью, которая позволяет перерабатывать препреги ПКМ на основе углеродных волокон в изделия на различных видах оборудования (автоклавы, прессы, вакуумные печи и др.) с минимальными трудовыми и энергетическими затратами.

Основная тенденция применения ПКМ [14] на основе углеродных волокон – это создание крупногабаритных элементов конструкций. Зарубежная и отечественная практика применения углепластиков показала целесообразность их использования прежде всего в авиационной (в конструкциях фюзеляжа, крыльев, хвостового оперения, деталей сборочных единиц (камеры сгорания) двигателей) и автомобильной промышленности (кузова легковых машин и кабины грузовых автомобилей, бамперы, двери, цистерны), судостроении (корпуса морских и речных судов, панели, перегородки, палубная надстройка, корпуса малых тральщиков), станкостроении (вращающиеся детали электрооборудования, станины станков, аккумуляторы кинетической энергии, маховики), строительстве и др. [15].

Приведенный в данной статье углепластик на основе препрега из гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя ВТкУ-2.280М можно рассматривать, например, для применения в качестве электропроводящего (молниезащитного) покрытия для летательных аппаратов с использованием одного слоя на поверхности изделий из углепластика.

Электропроводящие свойства композитов определяются характеристиками волокон. Значение электросопротивления для углеродных волокон составляет от $2 \cdot 10^{-1}$ до 10^8 Ом·м. Используя в углепластике углеродные волокна с различной электропроводностью, можно получать композиты с полупроводниковыми или электропроводящими свойствами.

Ткань представляет собой структуру из переплетенных жгутов, поэтому ее электрофизические свойства должны зависеть от площади поперечного сечения этих волокон. Другой важной для защитного слоя характеристикой является количество жгутов на единице ширины проводника или плотность плетения. В ткани жгуты могут переплетаться различным образом в направлении основы и утка, при этом может меняться их количество, порядок перехлестов и расстояние между ними, а значит и количество контактов между продольными и поперечными жгутами, а также контактов

с прилежащим слоем основного конструкционного материала, на который наносится защита. Поэтому необходимо учитывать такие характеристики, как плотность и характер плетения ткани, которые также влияют на качество электрических контактов между жгутами. Количество узлов переплетения между основной и утком ткани может обеспечивать эффект наличия на поверхности многочисленных «точек привязки» за счет рельефной структуры поверхности с тонким слоем связующего в отдельных точках. Такая структура поверхности провоцирует дробление канала молнии. Эффект дробления канала приводит к увеличению площади контакта канала молнии с поверхностью электропроводящего материала и к снижению удельной эффективной энергии, выделяющейся в каждой точке привязки из канала молнии и, следовательно, к уменьшению объемов разрушений. На основе ранее проведенных научно-исследовательских работ установлено, что саржевые структуры с числом филаментов 3000 при поверхностной плотности 200–280 г/м² обеспечивают более высокую электропроводимость углепластика [7]. Так, с целью увеличения электропроводимости углеродного наполнителя в структуру равнопрочного углеродного наполнителя вплетена медная проволока, что в конечном итоге повышает электропроводимость отформованного углепластика на его основе.

Еще одно применение углепластик на основе препрега из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя марки ВТкУ-2.280М может найти в качестве экранирующего материала от электромагнитного излучения [16].

Для экранирования (защита помещений от частичного или полного проникновения или выхода радиоволн) используется металлическая медная сетка тканого типа с полотняным и саржевым переплетением волокон (проволока утка захватывает сразу две нити основы). В результате перекрестия волокон получаются ячейки. По диаметру волокон и размеру ячеек различают редкие и сетчатые экраны для различного назначения. В свою очередь, сложная морфологическая структура элементарного углеродного волокна, волокнистая структура углепластика в целом и одновременно токопроводность углерода обеспечивают применение углепластика в качестве экрана от электромагнитных излучений. Соответственно, переплетенный гибрид углеродного волокна и металлической медной сетки в металлоуглеродном армирующем наполнителе может найти свое применение в любых устройствах, сооружениях и изделиях, где необходимо обеспечить снижение или гашение электромагнитного излучения в определенном диапазоне.

Для бытового применения возможно использование верхнего слоя препрега на основе российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М в дизайнерских решениях интерьера при изготовлении элементов декора или мебели из углепластика.

Следует учитывать, что для выдачи конкретных рекомендаций по применению в определенных областях промышленности и условиях эксплуатации изделий из ПКМ [17] на основе гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя ВТкУ-2.280М необходимо проведение комплекса исследований.

Заключения

1. Для расширения ассортимента углеродных армирующих наполнителей для производства ПКМ на российском рынке во ФГУП «ВИАМ» разработан отечественный гибридный металлоуглеродный армирующий наполнитель из углеродного волокна и вплетенной в его структуру медной проволоки и проведены исследования ПКМ на основе нового наполнителя.

2. Исследования и анализ проводили на образцах препрега и углепластика из российского гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М и расплавленного эпоксидного связующего (композиция 1) в сравнении с углепластиком на основе препрега из углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200 и расплавленного эпоксидного связующего (композиция 2) производства ФГУП «ВИАМ», а также проведена оценка свойств углепластика при использовании 12 слоев наполнителя ВТкУ-2.200 и одного слоя гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М.

Вплетенная в структуру углеродного гибридного армирующего наполнителя ММЛ проволока толщиной 0,1 мм:

– не оказывает влияния на реакционную способность в процессе отверждения препрега;

– оказывает влияние на толщину монослоя – увеличение на 0,04 мм;

– оказывает влияние на плотность материала и механические характеристики углепластика на основе препрега из гибридного металлоуглеродного наполнителя ВТкУ-2.280М в сравнении с углепластиком на основе углеродной равнопрочной ткани саржевого плетения ВТкУ-2.200, что необходимо учитывать при определении области применения материала и воздействующих на материал нагрузок.

4. Углепластик на основе препрега из гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя ВТкУ-2.280М можно рассматривать для применения, например, в качестве электропроводящего (молниезащитного) покрытия для летательных аппаратов, в качестве экранирующего от электромагнитного излучения материала, в дизайнерских решениях интерьера при изготовлении элементов декора или мебели из углепластика.

5. Для выдачи конкретных рекомендаций по применению в определенных областях промышленности и условиях эксплуатации изделий из ПКМ на основе гибридного металлоуглеродного армирующего наполнителя ВТкУ-2.280М необходимо проведение комплекса исследований материала.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Тканые армирующие углеродные наполнители для полимерных композиционных материалов (обзор) // Химические волокна. 2017. №2. С. 20–23.
3. Перепелкин Е.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 360 с.
4. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
5. Курносов А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №4. С. 331–334.
7. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2015. 720 с.
8. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
9. Колпачков Е.Д., Курносов А.О., Петрова А.П., Раскутин А.Е. Гибридные композиционные материалы для авиации на основе волокнистых наполнителей (обзор) // Вопросы материаловедения. 2020. №1 (101). С. 126–138.

10. Гуняева А.Г., Черфас Л.В., Комарова О.А., Куприенко В.М. Проведение испытаний на молниестойкость экспериментальных и конструктивно-подобных образцов, выполненных из углепластика, с молниезащитным покрытием // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №7 (55). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-10-10.
11. 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.
12. Черфас Л.В., Гуняева А.Г., Комарова О.А., Антюфеева Н.В. Анализ срока годности наномодифицированного препрега при хранении по его реакционной способности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №1 (37). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
13. Алексашин В.М., Александрова Л.Б., Матвеева Н.В., Машинская Г.П. Применение термического анализа для контроля технологических свойств термореактивных препрегов конструкционных композиционных материалов // Авиационная промышленность. 1997. №5–6. С. 38–43.
14. Бобович Б.Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2014. 400 с.
15. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. 1997. №3–4. С. 58–60.
16. Тюнина А.В. Композитные материалы: производство, применение, тенденции рынка // Полимерные материалы. 2018. №2. С. 27–29.
17. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.