

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-35-43

ВЛИЯНИЕ ТИПА УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ЛИТЬЕВЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА

Л.В. Соловьянчик¹, Л.А. Минаева¹, Д.А. Гуров¹

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

Аннотация. Низкий уровень электропроводящих свойств является одним из ограничивающих факторов применения термопластичных материалов для производства корпусов приборов, радиоуправляемой техники, элементов конструкций изделий авиационной и наземной техники, работающих в условиях сухого воздуха и взаимодействия с другими диэлектриками. Показано, что, изменяя тип углеродного наполнителя, дополнительно вводя модификатор с углеродными нанотрубками и пластификатор, можно влиять на электрофизические и механические характеристики литые полимерных композиций для достижения необходимого уровня свойств.

Ключевые слова: углеродное волокно, углеродные нанотрубки, полиамид, литые термопластичные материалы, электропроводность, антистатические свойства

Для цитирования: Соловьянчик Л.В., Минаева Л.А., Гуров Д.А. Влияние типа углеродного наполнителя на физико-механические и электропроводящие свойства литых термопластичных материалов на основе полиамида // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-35-43.

Scientific article

THE INFLUENCE OF CARBON FILLER TYPE ON THE PHYSICAL, MECHANICAL AND ELECTRICALLY CONDUCTIVE PROPERTIES OF POLYAMIDE-BASED INJECTION MOLDED THERMOPLASTIC MATERIALS

L.V. Solovyanchik¹, L.A. Minaeva¹, D.A. Gurov¹

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 low level of electrically conductive properties is one of the limiting factors for their use of thermoplastic materials for the production of instrument housings, radio-controlled equipment, structural elements of aircraft and ground equipment operating in conditions of dry air and interaction with other dielectrics. It is shown that by changing the type of the carbon filler, extra adding a modifier with carbon nanotubes and a plasticizer, it is possible to influence the electro-physical and mechanical characteristics of injection molded polymer compositions to achieve the required level of properties.

Keywords: carbon fiber, carbon nanotubes, polyamide, injection molded thermoplastic materials, electrical conductivity, antistatic properties

For citation: Solovyanchik L.V., Minaeva L.A., Gurov D.A. The influence of carbon filler type on the physical, mechanical and electrically conductive properties of polyamide-based injection molded thermoplastic materials. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-35-43.

Введение

Благодаря комбинации практических свойств и низкой плотности полимерные термопластичные материалы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1–4].

Однако низкий уровень электропроводящих свойств термопластичных материалов приводит к накоплению зарядов статического электричества на поверхности, что ограничивает их применение, в частности, для производства корпусов приборов и малой радиоуправляемой техники, в том числе беспилотных летательных аппаратов (особенно мультироторного типа), а также элементов конструкций изделий авиационной и наземной техники, работающих в условиях сухого воздуха, взаимодействия с другими диэлектриками и изготавливаемых методами литья под давлением, литьевым прессованием или штамповкой.

Электростатический разряд несет в себе опасность поражения людей электрическим током, вызывает повреждения электронных устройств и компьютеров, что может привести к неисправности оборудования, недостоверности показаний и стиранию информационной памяти. Кроме того, наличие электростатических зарядов способствует налипанию пыли, которая не только ухудшает внешний вид изделия, но и повышает взрыво- и пожароопасность. При полете беспилотных летательных аппаратов заряды статического электричества также накапливаются на поверхности корпуса и винтовых элементов, что в свою очередь нарушает работу радиоэлектронного оборудования и может привести к потере связи.

Для удаления заряда статического электричества материал должен обладать удельным электрическим сопротивлением в пределах 10^{10} Ом·см. В качестве антистатических добавок традиционно используют частицы и оксиды металлов. Благодаря своей доступности и невысокой стоимости наиболее применяемым токопроводящим наполнителем считается технический углерод (или электростатические сажи).

Для образования проводящих структур в полимерной матрице частицы наполнителя должны взаимодействовать. При смешивании с полимерным расплавом происходит дробление сажи на первичные агрегаты и их равномерное распределение по объему полимерной матрицы. При увеличении концентрации наполнителя расстояния между агрегатами уменьшаются, появляется возможность передачи электрона с агрегата на агрегат, формируются электропроводящие пути (электропроводящая сеть) и достигается порог перколяции. Как показывает практика, для эффективного снижения электрического сопротивления полимерного материала концентрация таких частиц должна составлять ≥ 20 % (по массе), что в свою очередь приводит к изменению как технологических, так и физико-механических свойств. В работах [5, 6] показано, что при увеличении концентрации сажи с 1 до 20 % (по массе) в термопластичном материале снижение показателя текучести расплава составляет до 10 раз, относительного удлинения – до 60 раз.

Одним из факторов, который определяет образование связанной непрерывной электропроводящей сети, является соотношение сил взаимодействия токопроводящих частиц между собой и с диспергирующей матрицей. Сильное взаимодействие между диспергирующей матрицей и функциональным наполнителем приводит к разрушению непрерывной электропроводящей структуры. Для образования проводящих структур необходимо сильное взаимодействие между частицами наполнителя [5], которое обеспечивают, например, углеродные нанотрубки, графен, оксид графена. Основными недостатками их использования являются низкая дисперсность в полимерных матрицах, особенно в высококристаллических полимерах из-за высокой агрегации частиц, и повышение стоимости материала.

Наиболее перспективным с точки зрения технологичности производства, а также ценообразования материала и готового изделия является использование двух типов токопроводящего наполнителя, например углеродного волокна (или сажи) и углеродных нанотрубок [7–9]. Однако в отличие от сажи углеродное волокно позволяет армировать материал, повышая его прочностные характеристики.

В данной работе исследовано направленное изменение физико-механических характеристик литевой термопластичной композиции на основе полиамида путем введения углеродного наполнителя различных типов, углеродных нанотрубок и пластификатора.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10–15].

Материалы и методы

Исследованы композиции на основе полиамида ПА 66Л с различными типами углеродного наполнителя:

- рубленое углеродное волокно (РУВ) длиной 7 мм с эпоксисовместимым аппретом с объемной плотностью до $1,82 \text{ г/см}^3$;
- измельченное углеродное волокно (ИУВ) длиной 3 мм без аппрета с объемной плотностью до $2,00 \text{ г/см}^3$;
- молотое углеродное волокно (МУВ) диаметром 6,6–7,2 мкм без аппрета с объемной плотностью до $2,00 \text{ г/см}^3$.

На рис. 1 представлен внешний вид используемых волокон.



Рис. 1. Внешний вид рубленого (а), измельченного (б) и молотого (в) углеродных волокон

Для повышения уровня (придания) электропроводящих свойств полиамидной композиции, наполненной углеродным волокном, в ряд образцов дополнительно введена универсальная добавка, которая представляет собой 10 %-ный концентрат на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ).

Для повышения пластичности материала при растяжении в ряд образцов также включен пластификатор диоктилсебацат (ДОС) с удельным электрическим сопротивлением $10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (ГОСТ 8728–88).

Наполненные композиции изготавливали способом экструзии в соответствии с температурными параметрами переработки полиамида ПА 66Л.

С точки зрения технологичности переработки методом экструзии наполненных полиамидных композиций наибольшим потенциалом обладают ИУВ и МУВ. В условиях данного эксперимента оптимальное распределение по объему полимерной матрицы РУВ достигнуто путем предварительного его опудривания с последующим прессованием и измельчением полученной плиты. Следует отметить, что после гранулирования стренги наполненной композиции часть РУВ и ИУВ измельчалась: размер гранул в поперечном сечении составлял до 3 мм, в продольном – до 5 мм.

Для исследования электропроводящих и физико-механических свойств из данных композиций получены образцы способом литья под давлением.

Электропроводящие свойства образцов оценивали по показателю сопротивления изоляции, определяемого, согласно ГОСТ 6433.2–71, на плоских образцах с двумя отверстиями с помощью двух электродов при постоянном напряжении 100 В.

Для определения влияния состава полиамидной композиции на механические характеристики в качестве оценочных параметров выбраны свойства при растяжении (прочность при разрыве, относительное удлинение и модуль упругости), которые определяли с использованием разрывной машины при комнатной температуре (23 ± 3 °С) в соответствии с ГОСТ 11262–2017. Следует отметить, что именно характеристики при растяжении обеспечивают качество сборки корпусных элементов.

Для изготовления корпусов беспилотных летательных аппаратов и переносного оборудования немаловажными являются весовые характеристики используемого материала. В данной работе также определена плотность образцов полиамидной композиции, наполненной углеродным волокном, методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены физико-механические характеристики при растяжении образцов полиамидных композиций, содержащих 15 % (по массе) углеродного волокна различных типов, в сравнении с образцом на основе ненаполненного полиамида ПА 66Л.

Таблица 1

Физико-механические характеристики при растяжении образцов полиамидных композиций, содержащих 15 % (по массе) углеродного волокна различных типов, и ненаполненного образца

Образец	Наполнитель	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости, ГПа	Сопротивление изоляции, Ом
0	Без наполнителя	59,2	34,8	1,5	$\geq 10^{14}$
1/0	РУВ	94,8	2,7	9,7	$1,2 \cdot 10^3$
2/0	ИУВ	78,0	3,2	7,0	$\geq 10^{14}$
3/0	МУВ	69,3	4,0	3,6	$\geq 10^{14}$

Примечание. РУВ, ИУВ, МУВ – рубленое, измельченное и молотое углеродное волокно соответственно.

Уменьшение размера углеродного волокна приводит к линейному снижению прочности и модуля упругости при растяжении, а также к увеличению относительного удлинения при разрыве. Максимальным показателем прочности при растяжении и наибольшим модулем упругости обладают образцы, наполненные РУВ с первоначальным размером 7 мм.

В табл. 2 представлены данные о влиянии пластификатора ДОС в количестве 4 % (по массе) и модификатора ОУНТ в количестве 1 % (по массе) на свойства образцов полиамидных композиций, наполненных МУВ, а также комбинацией МУВ и РУВ в различном соотношении.

Таблица 2

Свойства образцов полиамидных композиций различных составов

Образец	Наполнитель	Концентрация, % (по массе)	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости, ГПа	Сопротивление изоляции, Ом
3/1	МУВ	30	72,9	2,1	5,8	$\geq 10^{14}$
3/2	МУВ	30	52,3	4,2	5,5	$\geq 10^{14}$
	ДОС	4				
3/3	МУВ	20	54,1	5,6	4,0	$\geq 10^{14}$
	ДОС	4				
3/4	МУВ	30	43,9	4,5	3,9	$1,0 \cdot 10^5$
	ДОС	4				
	ОУНТ	1				
3/5	МУВ	30	44,5	2,4	4,9	$8,7 \cdot 10^4$
	ОУНТ	1				
4/1	ИУВ	20	76,4	1,1	10,6	$7,8 \cdot 10^4$
	ДОС	4				
4/2	ИУВ	15	72,8	1,9	9,8	$3,7 \cdot 10^4$
	ДОС	4				
	ОУНТ	1				
5/1	ИУВ	7,5	63,7	2,4	9,5	$6,3 \cdot 10^3$
	МУВ	20				
	ДОС	4				
	ОУНТ	1				
5/2	ИУВ	5	62,3	2,1	9,3	$5,8 \cdot 10^3$
	МУВ	25				
	ДОС	4				
	ОУНТ	1				

Примечание. ИУВ, МУВ – измельченное и молотое углеродное волокно соответственно, ДОС – диоктилсебацат, ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки.

Введение в состав полиамидной композиции пластификатора и углеродных нанотрубок позволяет существенно изменять механические и электропроводящие характеристики термопластичной композиции на основе полиамидной матрицы.

Так, на примере образцов 3/1 и 3/2, наполненных МУВ в количестве 30 % (по массе), при введении пластификатора прочность при разрыве уменьшается на ~30 %, относительное удлинение увеличивается в 2 раза, модуль упругости при этом практически не изменяется. Введение углеродных нанотрубок (образец 3/5) приводит также к снижению прочности на ~40 %, модуля упругости – на 15 % при сохранении относительного удлинения, однако придает материалу электропроводящие свойства: сопротивление изоляции составляет $8,7 \cdot 10^4$ Ом. Одновременное введение ДОС и ОУНТ (образец 3/4) позволяет повысить относительное удлинение при разрыве и электропроводность относительно контрольного образца (3/1).

Необходимо отметить, что введение 4 % (по массе) пластификатора ДОС и 1 % (по массе) модификатора ОУНТ в композицию, наполненную 15 % (по массе) измельченного волокна, не вызывает значительного изменения характеристик при растяжении, однако уменьшает показатель сопротивления изоляции до $3,7 \cdot 10^4$ Ом. В то же

время при повышении концентрации углеродного наполнителя до 20 % (по массе) без добавления модификатора ОУНТ, но с включением 4 % (по массе) пластификатора ДОС также не наблюдается значительного изменения характеристик при растяжении, а сопротивление изоляции составляет $7,8 \cdot 10^4$ Ом.

Не менее важным с точки зрения достижения требуемых свойств и технологичности процесса переработки полиамидной композиции с углеродным наполнителем является соотношение содержаний разных типов волокон, влияющее на характеристики изготовленных образцов. Наполнение пластификатором ДОС и модификатором ОУНТ в количестве 7,5 и 20 % (по массе) соответственно, а также 5 и 25 % (по массе) существенно не влияет на свойства образцов при растяжении, но изменяет электропроводность материала (рис. 2).

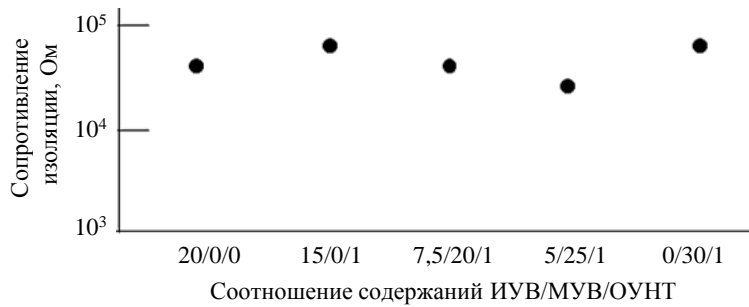


Рис. 2. Сопротивление изоляции образцов полиамидной композиции, содержащих измельченное (ИУВ), молотое (МУВ) углеродные волокна и одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) в различном соотношении

Введение 1 % (по массе) модификатора ОУНТ в состав термопластичной полиамидной композиции, наполненной углеродным волокном в количестве от 15 % (по массе), позволяет придать материалу электропроводящие свойства с показателем сопротивления изоляции от $1,0 \cdot 10^5$ до $3,7 \cdot 10^4$ Ом. Наименьшим уровнем сопротивления изоляции обладают образцы, содержащие 5 % (по массе) ИУВ и 25 % (по массе) МУВ.

В табл. 3 представлены значения плотности образцов полиамидной композиции различных составов.

Таблица 3

Плотность образцов полиамидной композиции различных составов

Образец	Наполнитель	Концентрация, % (по массе)	Плотность, г/см ³
3/1	МУВ	30	1,332
3/2	МУВ	30	1,333
	ДОС	4	
1/0	РУВ	15	1,210
5/1	ИУВ	7,5	1,306
	МУВ	20	
	ДОС	4	
	ОУНТ	1	
5/2	ИУВ	5	1,338
	МУВ	25	
	ДОС	4	
	ОУНТ	1	

Примечание. РУВ, ИУВ, МУВ – рубленое, измельченное и молотое углеродное волокно соответственно, ДОС – диоктилсебагинат, ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки.

Плотность образцов полиамидной композиции, наполненной углеродным волокном, составляет $<1,340 \text{ г/см}^3$. Наименьшим значением плотности обладает образец, содержащий минимальное количество углеродного наполнителя: 15 % (по массе) РУВ.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что, изменяя тип углеродного наполнителя, дополнительно вводя модификатор с углеродными нанотрубками и пластификатор, можно получать необходимый уровень электрофизических и механических свойств литевых полимерных композиций для достижения радиоэлектронной совместимости оборудования и оптимальных характеристик, обеспечивающих технологичность изготовления и сборки элементов корпусных изделий.

Заключения

Методом экструзии получены композиции на основе термопластичной полиамидной матрицы, наполненные углеродным волокном различных размеров, модификатором ОУНТ и пластификатором, из которых изготовлены образцы способом литья под давлением. Исследованы электрофизические свойства и характеристики при растяжении образцов.

Уменьшение размера волокна приводит к линейному снижению прочности и модуля упругости при растяжении, а также к увеличению относительного удлинения. Так, введение РУВ с первоначальной длиной 7 мм приводит к повышению прочности до 94,8 МПа, модуля упругости – до 9,7 ГПа, а также к снижению относительного удлинения до 2,7 %.

Введение в состав полиамидной композиции, наполненной углеродным волокном, углеродных нанотрубок в количестве 1 % (по массе) позволяет придать материалу электропроводящие свойства с показателем сопротивления изоляции до $5,8 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.

Одновременное введение пластификатора ДОС и модификатора ОУНТ позволяет повысить относительное удлинение при разрыве и придать материалу антистатические свойства с показателем сопротивления изоляции $<10^5 \text{ Ом}$.

Плотность образцов полиамидной композиции, наполненной углеродным волокном в количестве до 30 % (по массе), составляет $<1,340 \text{ г/см}^3$.

Изменяя тип углеродного наполнителя, дополнительно вводя модификатор ОУНТ и пластификатор ДОС, можно регулировать электрофизические и механические характеристики литевых полимерных композиций для достижения необходимого уровня свойств.

Благодаря прочностным характеристикам и антистатическим свойствам термопластичные материалы, наполненные углеродным волокном и углеродными нанотрубками, можно использовать для изготовления корпусов переносного и подвесного радиоэлектронного оборудования, корпусов фюзеляжа малой радиоуправляемой техники для предотвращения накопления зарядов статического электричества на поверхности и обеспечения радиоэлектронной совместимости оборудования.

Список источников

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. 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: 10.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.

3. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
4. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
5. Meincke O., Kaempfer D., Weickmann H. et al. Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene // *Polymer*. 2004. Vol. 45. P. 739–748.
6. Kanbur Y., Küçükyavuz Z. Electrical and mechanical properties of polypropylene/carbon black composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2009. Vol. 28. No. 18. P. 2251–2260.
7. Bauhofer W., Kovacs J.Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites // *Composites science and technology*. 2009. Vol. 69. No. 10. P. 1486–1498.
8. Кондрашов С.В., Соловьянчик Л.В., Минаева Л.А., Шорстов С.Ю. Термопластичная полиамидная композиция с электропроводящими свойствами // *Труды ВИАМ*. 2023. № 4 (122). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-40-48.
9. Deng H., Lin L., Ji M. et al. Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials // *Progress in Polymer Science*. 2014. Vol. 39. No. 4. P. 627–655.
10. Carbon nanotubes in multiphase polymer blends // *Polymer–Carbon Nanotube Composites: Preparation, properties and applications* / eds. T. McNally, P. Pötschke. Woodhead Publishing, 2011. P. 587–620.
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. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
13. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
14. Каблов Е.Н. Что такое инновации // *Наука и жизнь*. 2011. № 5. С. 2–6.
15. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7–17.

References

1. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. 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: November 10, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
3. Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.

4. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
5. Meincke O., Kaempfer D., Weickmann H. et al. Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene. *Polymer*, 2004, vol. 45, pp. 739–748.
6. Kanbur Y., Küçükyavuz Z. Electrical and mechanical properties of polypropylene/carbon black composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, vol. 28, no. 18, pp. 2251–2260.
7. Bauhofer W., Kovacs J.Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Composites science and technology*, 2009, vol. 69, no. 10, pp. 1486–1498.
8. Kondrashov S.V., Solovyanchik L.V., Minaeva L.A., Shorstov S.Yu. Thermoplastic polyamide composition with electrically conductive properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 08, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-40-48.
9. Deng H., Lin L., Ji M. et al. Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials. *Progress in Polymer Science*, 2014, vol. 39, no. 4, pp. 627–655.
10. Carbon nanotubes in multiphase polymer blends. *Polymer–Carbon Nanotube Composites: Preparation, properties and applications*. Eds. T. McNally, P. Pötschke. Woodhead Publishing, 2011, pp. 587–620.
11. 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.
12. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
13. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
14. Kablov E.N. What is innovation. *Nauka i zhizn*, 2011, no. 5, pp. 2–6.
15. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.

Информация об авторах

Соловьянчик Людмила Владимировна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Минаева Любовь Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Гуров Дмитрий Александрович, заместитель начальника лаборатории по науке, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Lyudmila V. Solovyanchik, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Lyubov A. Minaeva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Dmitriy A. Gurov, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.11.2023.
 The article was submitted 28.11.2023; approved and accepted for publication after reviewing 30.11.2023.