

УДК 678.8

С.В. Кондрашов¹, К.А. Шашкеев¹, Г.Н. Петрова¹, И.В. Мекалина¹

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419

Представлены данные по разработкам ФГУП «ВИАМ» в области создания электропроводящих ПКМ с углеродными нанотрубками. Показана возможность придания гибридным ПКМ (ГПКМ) гидрофобных свойств. Приведены данные по электропроводности и углу смачивания ГПКМ. В качестве матриц использованы как термореактивные связующие на основе эпоксидной смолы, так и термопластичные – на основе полиарилсульфона. Представлены образцы ГПКМ с различными видами молниезащитных покрытий (МЗП).

Представлены результаты комплексной работы по разработке технологии получения птицестойкого слоистого абразивостойкого полимерного остекления с интегрированным электрообогреваемым элементом криволинейной формы.

Ключевые слова: гибридные полимерные композиционные материалы, гидрофобные свойства, молниезащитные покрытия, углеродные нанотрубки, полимерное остекление.

S.V. Kondrashov, K.A. Shashkeev, G.N. Petrova, I.V. Mekalina

Constructional polymer composites with functional properties

Here some data are given to present development of VIAM in the field of carbon nanotube-filled electrically conductive polymer composites. It has been found that hybrid polymer composite materials (HPCM) can be made hydrophobic. The paper provides data on electrical conductivity and wetting angle of some HPCM. As matrices of these materials both thermosetting epoxy binders and thermoplastic binders based on polyarylsulfone have been used. Samples of HPCM with different types of lightning-proof coatings are discussed.

The results of complex work on development of a technological process of production of bird- and abrasive-resistant curved multilayer polymer glasses with embedded electrical heaters are also presented.

Keywords: hybrid polymer composites, hydrophobic properties, lightning-proof coatings, carbon nanotubes, polymer glass.

¹ Федеральное 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

За 30 лет, начиная с 80-х годов прошлого века, доля композиционных материалов в конструкции летательных аппаратов (ЛА) выросла со скромных 5–6% в пассажирских авиалайнерах Airbus A310 и Boeing B767 до 50% в B787 – «дримлайнер». Причины такого роста ясны и понятны – применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет снизить массу конструкции на 10–20% и существенно (в разы) уменьшить затраты труда и материалоемкость при изготовлении сложнопрофильных деталей.

Однако широкая замена металлических деталей на конструкции из ПКМ в конструкции фюзеляжа выявило ряд серьезных проблем, решение которых приводит к снижению выигрыша от применения ПКМ в конструкции ЛА.

Так, во время наземного обслуживания ЛА возможны удары по фюзеляжу механизированными средствами для погрузочных работ (трапы, тягачи, погрузчики). Если удар по металлической поверхности приводит к возникновению вмятины, которую легко устранить, то удар по конструкции из ПКМ может привести к возникновению межслоевого расслаивания, которое практически не диагностируется и не подлежит ремонту. Для устранения возможности возникновения данного дефекта проектировщики Boeing B787 должны были увеличить толщину обшивки около дверей до 18 мм.

В отличие от металла поверхность ПКМ, даже армированных углеволокном, обладает существенно меньшей электропроводностью. Это ведет к нарушению эквипотенциальности поверхности ЛА за счет накопления электростатических зарядов. Такие заряды могут вносить помехи в работу бортового радиоэлектронного оборудования, инициировать возникновение молниевых разрядов, что существенно снижает безопасность полетов. При прямом воздействии молниевых разрядов на поверхность ПКМ потеря несущей способности материала оказывается большей по сравнению с металлической конструкцией, из-за различия физических механизмов взаимодействия молниевых разрядов с металлом и ПКМ. Нанесение на поверхность фюзеляжа металлической сетки или фольги для увеличения электрической проводимости поверхности ПКМ, использование отсеков «Фарадея» для экранирования бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) беспилотных летательных аппаратов увеличивает массу конструкции и усложняет технологию ее изготовления.

Меньшая по сравнению с металлом теплопроводность ПКМ обуславливает более высокие температуры нагрева тепловых элементов антиобледенительной системы, что может приводить к возникновению локального перегрева и деструкции полимерной матрицы ПКМ.

Нельзя обойти стороной и вопрос изменения термо- и физико-механических характеристик конструкции из ПКМ при климатических воздействиях. Уменьшение модуля упругости и температуры стеклования при влагонасыщении ПКМ приводит к тому, что конструкторы вынуждены увеличивать запас прочности конструкции, что опять же приводит к увеличению ее массы.

Таким образом, увеличение стойкости ПКМ к воздействию ударных нагрузок, факторов климатического старения, придание ПКМ функциональных свойств, таких как электропроводность в продольном и поперечном направлениях (обеспечение молниестойкости, придание поверхности антистатических свойств, экранирование БРЭО от воздействия внешних электромагнитных импульсов) и сверхгидрофобность (антиобледенительные покрытия), а также разработка радиопоглощающих ПКМ конструкционного назначения является в настоящее время крайне важной и актуальной задачей материаловедения. Разработка конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) со специальными свойствами на основе термореактивных или термопластичных матриц (в том числе наномодифицированных), углеродных, стеклянных или органических наполнителей является одной из задач, входящих в комплексное научное направление 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–4]).

Гибридные полимерные композиционные материалы

Возможный вариант решения задачи придания функциональных свойств конструкционным материалам – разработка гибридных полимерных композиционных материалов (ГПКМ), в которых наряду с традиционными армирующими наполнителями (стекло- или углеволокно) используются различные функциональные наполнители: углеродные нанотрубки (УНТ) [5–8], углеродсодержащие наночастицы [9, 10], металлуглеродные нанокомпозиты [11].

Основная проблема, которая возникает при попытке придания ГПКМ высокого уровня функциональных свойств (например, электропроводности), состоит в том, что увеличение концентрации УНТ в связующем связано с резким увеличением вязкости и переходом «жидкого» связующего в тиксотропное состояние. Это обстоятельство делает невозможным использование традиционных способов получения препрега.

Для решения данной задачи во ФГУП «ВИАМ» совместно с ИПХФ РАН и ИСПМ РАН разработан новый подход – нанесение модифицированного УНТ связующего из дисперсии, где в качестве дисперсионной среды используется легколетучий растворитель (ацетон), а частицы дисперсионной фазы содержат нативные УНТ или УНТ, ковалентно модифицированные функциональными группами, эпоксидную смолу, отвердитель. В случае

использования нефункционализированных УНТ в состав дисперсии входит модификатор (компатибилизатор). При этом в качестве модификатора используются полимеры, обеспечивающие нековалентную функционализацию нанотрубок и регулирующие взаимодействие в подсистемах УНТ/УНТ, УНТ/матрица.

По сравнению с ковалентной модификацией данный подход имеет ряд преимуществ:

– хотя взаимодействие между каждым звеном блока и поверхностью УНТ является более слабым, чем ковалентное взаимодействие между функциональной группой и УНТ, большое количество блоков, входящих в состав сополимера, обеспечивает более прочное его закрепление на поверхности нанотрубки;

– нековалентная функционализация за счет изменения соотношения между блоками, входящими в состав сополимера, и строения блока функциональных связей позволяет точно регулировать энергию взаимодействия с полимерной матрицей. Использование ряда сополимеров с известным соотношением блоков и их строением позволяет исследовать фундаментальные закономерности влияния энергии взаимодействия УНТ/матрица на функциональные и конструкционные свойства нанокompозита;

– данный подход позволяет контролируемым образом изменять степень агрегации УНТ и архитектуру образующихся наноструктур. Если для получения нанокompозита с высоким уровнем механических свойств требуется равномерное распределение УНТ по матрице, то для получения электропроводящих нанокompозитов при минимальной концентрации УНТ, их частичная агрегация оказывается более предпочтительной.

Кроме того, нековалентная функционализация УНТ является более технологичным и дешевым способом получения исходных компонентов для получения нанокompозита по сравнению с ковалентной функционализацией.

В данной работе предложен способ создания гидрофобного, электропроводящего ПКМ на основе эпоксидного связующего и армирующего наполнителя из стеклоткани путем одновременного введения в его состав наноразмерных объектов – УНТ функционализированных в газовой фазе (УНТ-ФГФ) и раствора теломеров тетрафторэтилена (ТФЭ) в ацетоне – торговая марка «Черфлон» (ЧФ) [12].

На первом этапе получения ГПКМ совместно диспергировали УНТ-ФГФ и ЧФ в ацетоне с последующим добавлением в композицию эпоксидной смолы с отвердителем. Полученная композиция легко наносится на армирующий наполнитель из шприца (рис. 1) или с помощью краскопульта, образуя однородное покрытие.

Из шести пластин препрега на основе пропиточной композиции, которая содержала УНТ-ФГФ, ЧФ, ЭК в соотношении 7:7:100 мас. ч.,

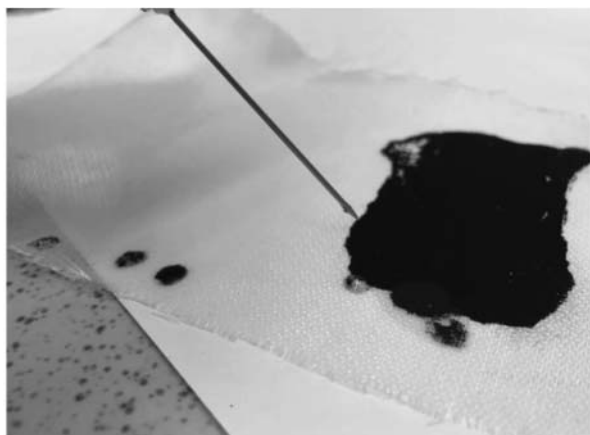


Рис. 1. Нанесение дисперсии на стеклоткань из шприца

методом прессования был изготовлен образец гибридного полимерного композиционного материала.

Величина удельного объемного сопротивления исследованного образца ГПКМ вдоль и поперек плоскости укладки армирующего наполнителя составляет 19 и $6,7 \cdot 10^2$ Ом·см соответственно.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов отражения R , пропускания T и поглощения A электромагнитного излучения (ЭМИ) на частотах f , равных 27,0; 30,5 и 34,0 ГГц, для пластины ГПКМ толщиной 0,68 мм.

Таблица 1

Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения ЭМИ

f , ГГц	R , %	T , %	A , %
27,0	80,0	1	19
30,5	80,0	1	19
34,0	74,7	1	24,3

В табл. 2 приведены данные об изменении угла смачивания образца ГПКМ в за-висимости от состава пропиточной композиции.

Таблица 2

Зависимость угла смачивания поверхности ГПКМ от состава пропиточной композиции

Условный номер образца	Пропиточный состав			Угол смачивания, град
	УНТ-ФГФ	«Черфлон» (ЧФ)	Эпоксидное связующее	
	мас. ч.			
1	0	0	100	78,2
2	7	3,5	100	87,4
3	7	7	100	98,3
4	7	15	100	97,2
5	100	100	100	103,4

Из представленных в табл. 2 данных можно сделать вывод, что угол смачивания зависит от соотношения компонентов, входящих в пропиточный

состав. С увеличением количества ЧФ в пропиточном составе от 0 до 7 мас. ч. при неизменном количестве УНТ-ФГФ угол смачивания увеличивается на 20 град. Дальнейшее увеличение доли ЧФ до 15 мас. ч. не приводит к увеличению угла смачивания. Увеличение угла смачивания до 103 град (образец 5) происходит при использовании пропиточного состава, содержащего равные количества УНТ-ФГФ, ЧФ и эпоксидной композиции. На рис. 2 приведена микрофотография поверхности полученного пластика.

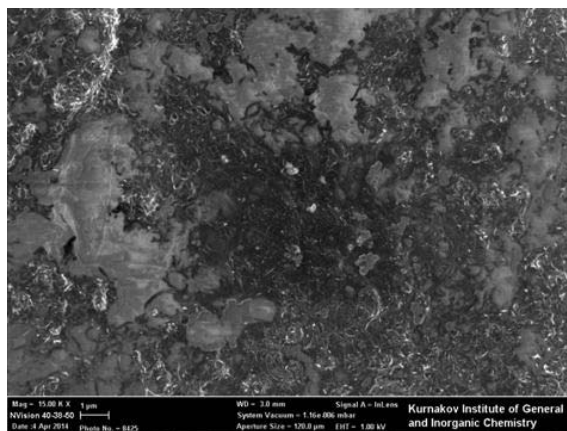


Рис. 2. Микрофотография поверхности пластика – пропиточный состав 2 (см. табл. 2)

Элементный анализ поверхности показал, что фтор локализуется в темных, электропроводящих областях поверхности ГПКМ. Естественно предположить, что в этих областях содержится большее количество ЧФ, который обеспечивает их гидрофобность, в то время как области с более высокой смачиваемостью содержат практически чистую эпоксидную часть пропиточной композиции. Для проявления на поверхности ГПКМ гидрофобных областей использовали «жертвенный» слой – непропитанный слой стеклоткани, который накладывали на поверхность пакета из листов препрега перед прессованием, а после прессования удаляли. В этом случае части матрицы, обладающие более высокой адгезией к «жертвенному» (эпоксидная часть пропиточной композиции) слою стеклоткани, удаляются вместе с ним.

После удаления «жертвенного» слоя с поверхности ГПКМ (пропиточный состав 3 – см. табл. 2) величина краевого угла смачивания его поверхности увеличилась с 98 до 136 град (рис. 3, а). Естественным объяснением описанного эффекта является образование микрорельефа на поверхности ГПКМ после удаления «жертвенного» слоя с «выходом» на поверхность композита электропроводящей гидрофобной фазы УНТ-ФГФ/ЧФ (рис. 3, б).

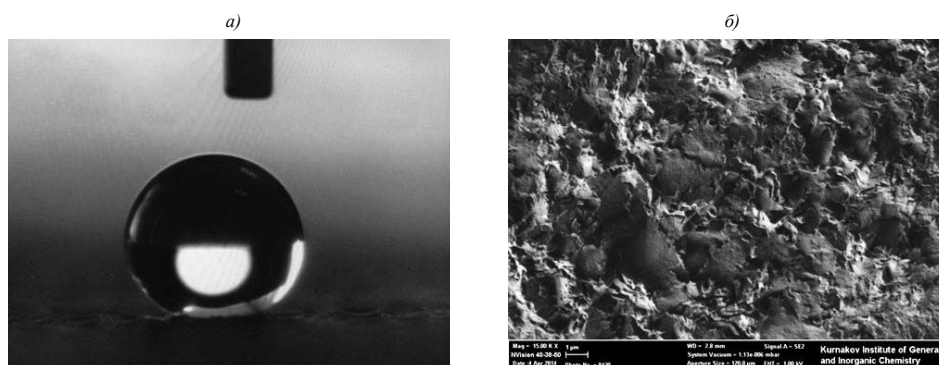


Рис. 3. Фотография капли на поверхности ГПКМ (а), СЭМ фотография поверхности ГПКМ (б) после удаления «жертвенного» слоя

Таким образом, гибридный полимерный композиционный материал, полученный при прессовании препрега, пропитанного композицией, которая содержит УНТ-ФГФ (7 мас. ч.), теломеры тетрафторэтилена (7 мас. ч.) и эпоксидную смолу с отвердителем (100 мас. ч.), обладает рядом функциональных свойств. Величина удельного объемного сопротивления исследованного образца ГПКМ вдоль и поперек плоскости укладки армирующего наполнителя составляет 19 и $6,7 \cdot 10^2$ Ом·см соответственно. Пластина ГПКМ толщиной 0,68 мм ослабляет ЭМИ в диапазоне 27–34 ГГц в 100 раз. При этом доля отраженного излучения составляет 75–80%. Поверхности ГПКМ могут быть приданы гидрофобные свойства, характеризующиеся высоким значением краевого угла смачивания (136 град).

Молниезащитные покрытия

В процессе эксплуатации детали и изделия из ПКМ, находящиеся на поверхности фюзеляжа ЛА, могут подвергаться воздействию разрядов молнии. Низкая проводимость ПКМ не позволяет надежно проводить токи молнии на элементы, находящиеся под обшивкой внутри летательного аппарата. В слое композита происходит быстрое поглощение энергии электрического разряда, локальный нагрев, деструкция связующего и локальное разрушение ПКМ. В условиях полета расслоение армирующего наполнителя, выгорание связующего, достигающие от единиц до десятков сантиметров, могут значительно возрасти под действием набегающего потока, что приведет к потере несущей способности конструкции.

Все системы молниезащиты для композитного фюзеляжа самолета, применяемые ранее и существующие в настоящее время, — это материалы с высоким уровнем величин поверхностной электро- и теплопроводности. Используются, в частности, молниезащитные системы на основе

медных трикотажных сеток или фолы различной конфигурации и пленки или напыленных металлов (алюминий, медь, никель), медных или алюминиевых шин. О недостатках таких систем было упомянуто ранее.

Одним из наиболее перспективных и эффективных путей перехода на качественно новый уровень безопасности и надежности авиационной техники является разработка новых молниезащитных систем на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных углеродными наночастицами (УНЧ), входящих в силовую схему конструкции.

Во ФГУП «ВИАМ» длительное время ведутся работы по разработке и исследованию молниезащитных покрытий для ПКМ. В рамках проведенных НИР во ФГУП «ВИАМ» совместно с организациями-соисполнителями проведены испытания конструктивных образцов ПКМ с различными видами молниезащитных покрытий – МЗП (рис. 4). Для испытаний образцов использован комплекс высоковольтных установок, обеспечивающих воспроизведение молниевых разрядов, соответствующего требованиям Авиационных правил (АП-25), квалификационных требований (КТ-160Д) и зарубежных норм (FAR, JAR). Воздействие молниевых разрядов моделировали импульсом тока с параметрами $I=200$ кА и $Q=20$ Кл.

При испытаниях молниестойкости конструктивных образцов углепластиков с различными видами молниезащитных покрытий выявлено:

- углепластиковая основа образцов вследствие проводимости основы позволяет растекаться току разряда до контакта с металлом, при этом возникают повреждения материала образца, в некоторых случаях со сквозным пробоем или образованием трещин;

- молниезащитное покрытие в виде бронзовой (медной) сетки улучшает растекание тока разряда по образцу до контакта с металлом, не приводя к сквозному пробоему образца;

- молниезащитное покрытие с использованием углеродных наночастиц приводит к аналогичным результатам;

- лакокрасочное покрытие, использованное в представленных образцах, приводит к увеличению степени повреждения углепластиковой основы;

- использование лакокрасочного покрытия для образца с наночастицами усиливает эффект повреждения материала образца.

С учетом полученных результатов можно сделать вывод о необходимости доработки технологии изготовления и состава МЗП на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, содержащих в своем составе УНЧ.

Следует отметить, что создавать молниестойкие покрытия необходимо для каждого отдельно взятого изделия и агрегата планера самолета с учетом:

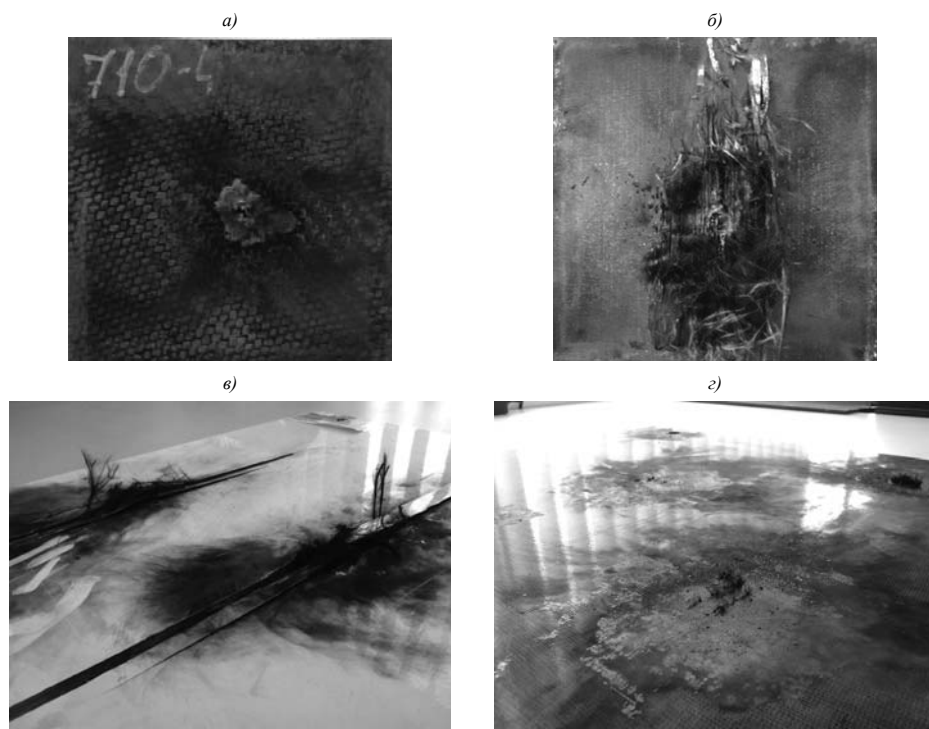


Рис. 4. Образец углепластика после воздействия молниевых разряда с молниезащитным покрытием (МЗП) марки ВЭП-1 (а) и без МЗП (б).

Образец углепластика с лаковым покрытием без МЗП (в)
и с МЗП на основе медной сетки (г)

- характеристик используемых углеродного наполнителя и полимерного связующего;
- расположения и конструктивных особенностей;
- влияния толщины и схемы армирования обшивки;
- расположения подкрепляющего силового набора.

Необходимо проводить испытания на молниестойкость вновь разрабатываемых композиционных материалов, в том числе углепластиков на основе отечественных связующих и углеродных наполнителей, применяемых в обшивках, деталях и агрегатах фюзеляжа самолета, выходящих на внешний контур и подверженных воздействию молниевых ударов.

Особо следует обращать внимание на испытания интегральных и трехслойных сотовых конструкций, которые необходимо проводить на образцах, максимально приближенных к реальным конструкциям изделия по толщине обшивки, схеме армирования, высоте, размеру сот и размещению элементов жесткости.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработаны* электропроводящие и молниезащитные покрытия, обладающие повышенной стойкостью к поражению смещающимися разрядами молнии с силой тока 200 кА, переносимым зарядом 20–30 Кл, а именно:

– электропроводящее покрытие марки ВЭП-1 на основе углеродной равнопрочной ткани УТР300-3-200С2 с поверхностной плотностью порядка 200 г/м² и термостойкого цианэфирного связующего ВСЦ-14, модифицированного углеродными наночастицами;

– электропроводящее покрытие марки ВЭП-2 на основе углеродной равнопрочной ткани УТР300-3-280 с поверхностной плотностью порядка 300 г/м² и термостойкого цианэфирного связующего ВСЦ-14, модифицированного углеродными наночастицами;

– молниезащитные покрытия марок ВКУ-53М3/230 и ВКУ-53М3/480 на основе равнопрочных углеродных тканей саржевого и сатинового плетений с интегрированной в структуру ткани медной проволокой и эпоксидного связующего марки ВС-2526к, модифицированного углеродными наночастицами.

Конструкционные термопластичные материалы с антистатическими свойствами

Большая удельная поверхность, наличие системы сопряженных π -связей, позволяющих электрону практически свободно передвигаться по поверхности нанообъекта, возможность организации углеродных нанотрубок (УНТ) в разнообразные топологические структуры микромасштабов делает их одними из наиболее перспективных объектов для придания нанокompозитам электропроводящих, молниезащитных, радиоэкранирующих и радиопоглощающих свойств. В настоящее время ~80% мирового производства многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) используется для придания электропроводящих свойств полимерным матрицам.

Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики конструкционных нанокompозитов с углеродными нанотрубками, является существенное изменение физико-механических свойств полимерной матрицы при введении нанонаполнителя. Так, авторы работы [13] установили, что введение в поликарбонат 3% УНТ приводит к уменьшению относительного удлинения со 105 до 4% – полимерная матрица «охрупчивается». Данный эффект может быть в значительной мере скомпенсирован путем выбора оптимальных способов смешения [14] или приготовления суперконцентрата, содержащего нанотрубки [15].

* Материалы предоставлены А.Г. Гуняевой (ФГУП «ВИАМ»).

При разработке состава композиционного термопластичного материала с антистатическими свойствами в качестве матричного полимера использован порошок полиарилсульфон марки ПСФФ-30. Его отличительной особенностью является наличие в рецептуре модификатора – фенолфталеина с кардовыми фрагментами (объемными боковыми циклическими группами в повторяющемся звене макромолекулы полисульфона), позволяющего повысить температуру стеклования материала на 10% и прочность при растяжении – на 35% (по сравнению с базовой маркой ПСФ-150).

Для придания полиарилсульфону функциональных (антистатических) свойств матрицу модифицировали многослойными углеродными нанотрубками марки «Таунит-М» (наружный диаметр 8–15 нм, длина >2 мкм). Число нанослоев одной трубки: 6–10. Удельная геометрическая поверхность составляет 300–320 м²/г.

На основании большого объема экспериментальных исследований, выполненных во ФГУП «ВИАМ», разработана технология получения конструкционного материала с антистатическими свойствами марки ВТП-7, который не имеет аналогов в отечественной промышленности и по уровню эксплуатационных характеристик не уступает зарубежным материалам аналогичного назначения.

Материал ВТП-7 обладает комплексом уникальных свойств: при температуре испытаний 20°С температура стеклования составляет 202,5–218°С; плотность 1265 кг/м³; прочность при растяжении равна 86,4 МПа; характеризуется стабильностью размеров (колебания усадки 0,05%); ТКЛР в диапазоне температур от -60 до +180°С – от $47,0 \cdot 10^{-6}$ до $51,3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; категория горючести – самозатухающий; величина удельного сопротивления $2,2 \cdot 10^5$ Ом·см.

Микроструктурные исследования образцов полиарилсульфона ПСФФ-30, модифицированного углеродными нанотрубками «Таунит-М», показали, что углеродные нанотрубки активно влияют на процесс структурообразования и характер разрушения литьевого полиарилсульфона ПСФФ-30. Во всех случаях, независимо от содержания в полиарилсульфоне нанотрубок, образуется один очаг разрушения, вокруг которого хорошо видны зеркальная и шероховатая зоны, причем в этих зонах четко проявляется волновой характер разрушения. Введение нанотрубок в полимер приводит к увеличению на порядок (с 0,1 до 1,0 мкм) размеров частиц микродисперсной фазы и уменьшению плотности их упаковки (рис. 5).

Придание функциональных свойств материалам остекления

Одним из ключевых элементов обеспечения безопасности полетов авиационной техники является применение многослойного электрообогреваемого остекления, позволяющего исключить такой негативный фактор, как

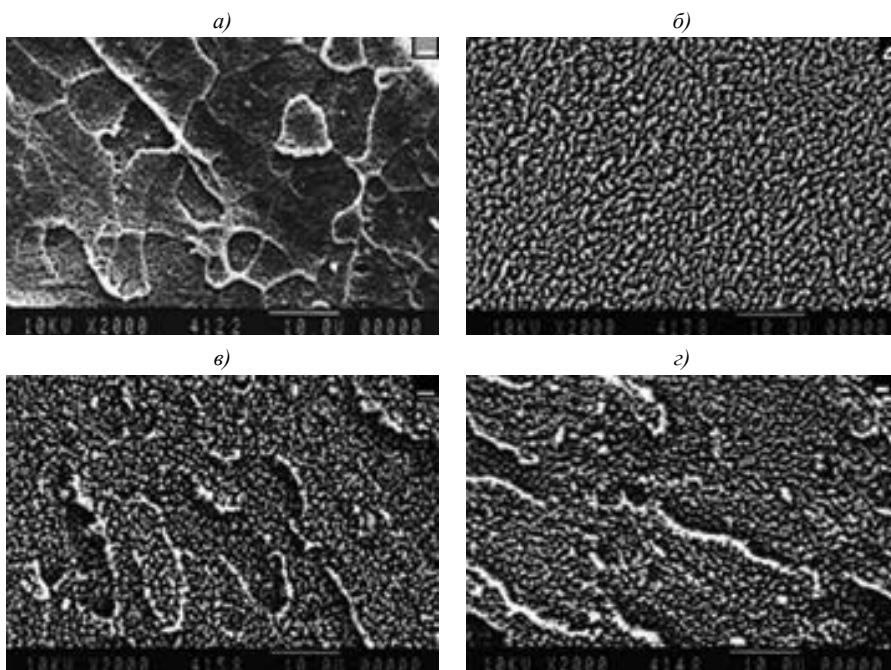


Рис. 5. Микроструктура ($\times 2000$; участки в зеркальной зоне) скола образца полиарилсульфона ПСФФ-30 в исходном состоянии (а) и с добавлением 3 (б), 5 (в) и 7% (г) УНТ «Таунит-М»

ухудшение обзора, возникающее в результате обледенения и запотевания элементов остекления. В настоящее время в России и за рубежом применяется электрообогреваемое остекление на основе силикатного стекла. Кроме того, за рубежом фирмами Saint-GobainSully (Франция) и PPG Aerospace (США) разработаны электрообогреваемые элементы остекления на основе полимерных стекол. Замена силикатного стекла на полимерное позволяет снизить массу электрообогреваемых деталей остекления в 2 раза. Во ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «ОНПП «Технология» и АО «ГНИИХТЭОС» проведена комплексная работа по разработке технологии получения птицестойкого слоистого абразивостойкого полимерного остекления с интегрированным электрообогреваемым элементом криволинейной формы (рис. 6). Разработанный абразивостойкий обогреваемый органический слоистый материал для деталей остекления обладает следующими свойствами: интегральный коэффициент пропускания – не менее 70%, стойкость к поверхностному растрескиванию («серебростойкость») – не менее 20 мин, индекс абразивостойкости по методу Табера: 0, ударная вязкость – не менее 30,0 кДж/м², величина поверхностного сопротивления прозрачного



Рис. 6. Схема многослойного остекления

электропроводящего покрытия $26 \text{ Ом}/\square$, при электрическом нагреве с плотностью мощности $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ температура на поверхности образца между токоподводами составляла от 56 до 68°C .

Соисполнителем работы АО «ОНПП «Технология» изготовлена типовая деталь лобового остекления вертолета, проведены ее испытания на птицестойкость (ударную стойкость) в условиях испытательного полигона — изделие сохранило свою целостность, подтверждая высокую ударную прочность разработанной композиции (рис. 7).



Рис. 7. Типовая деталь лобового остекления вертолета размером $1000 \times 900 \text{ мм}$

Выводы

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» успешно решаются задачи создания молниестойких, гидрофобных, электропроводящих ПКМ,

электропроводящих литевых материалов, электрообогреваемых деталей остекления. Придание функциональных свойств ПКМ конструкционного назначения позволит повысить весовую эффективность их использования в конструкции ЛА, увеличить надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 2-е изд. М.: ВИАМ, 2013. 544 с.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Lubineau G., Rahaman A. A review of strategies for improving the degradation properties of laminated continuous-fiber/epoxy composites with carbon-based nanoreinforcements // *CARBON*. 2012. Vol. 50. P. 2377–2395.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В., Соловьянич Л.В. Физико-механические свойства нанокompозитов с УНТ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №5. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-8-8.
7. Кондрашов С.В., Гуняева А.Г., Шашкеев К.А. и др. Электропроводящие гибридные полимерные композиционные материалы на основе нековалентно функционализированных углеродных нанотрубок // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-10-10.
8. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В., Соловьянич Л.В. Перспективные технологии получения функциональных материалов конструкционного назначения на основе нанокompозитов с УНТ// *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №3. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-7-7.
9. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных

- композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 28–42.
10. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Молниестойкость современных полимерных композитов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 36–42.
 11. Popkov O.V., Yurkov G.Y., Fionov A.S. Stabilization of nanoparticles on the surface of detonation nanodiamond // Physics, chemistry and application of nanostructures. Singapore: World Scientific, 2009. P. 369–372.
 12. Кирюхин Д.П., Ким И.П., Бузник В.М. и др. Радиационно-химический синтез теломеров тетрафторэтилена и их использование для создания тонких защитных фторполимерных покрытий // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. №3. С. 66–71.
 13. Li Chen, Xiu-Jiang Pang, Zuo-Long Yu. Study on polycarbonate/multi-walled carbon nanotubes composite produced by melt processing // Materials Science and Engineering A. 2007. Vol. 457. P. 287–291.
 14. Eitan A., Fisher F.T., Andrews R. et al. Reinforcement mechanisms in MWCNT-filled polycarbonate // Composites Science and Technology. 2006. Vol. 66. P. 1159–1170.
 15. Chin Yuan-Chen. Design and Fabrication of Transparent Polycarbonate/Carbon Nanotube Composite Films // Electronic Theses, Treatises and Dissertations. 2007. Paper 3811.