

УДК 678.073

Г.Н. Петрова<sup>1</sup>, С.А. Ларионов<sup>1</sup>, М.М. Платонов<sup>2</sup>, Д.Н. Перфилова<sup>1</sup>

## ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ АВИАЦИИ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436

*Представлены наиболее значимые достижения Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) в период 2012–2016 гг. в области развития направления полимерных функциональных авиационных материалов, реализованного в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–3].*

*Описаны основные разработки в области термопластов: литьевого термопласта ВТП-7 с повышенными антистатическими свойствами, листового композиционного термопластичного термостойкого материала ВКУ-44 и нового самозатухающего материала на основе поликарбоната для аддитивной FDM-технологии.*

*Рассмотрены основные свойства разработанных термопластичных материалов и рекомендуемые области их применения.*

**Ключевые слова:** термопласты, литье под давлением, экструзия, прессование, переработка, связующее, наполнитель, композиционный термопластичный материал, углеродные нанотрубки, 3D-печать, FDM-технология.

G.N. Petrova, S.A. Larionov, M.M. Platonov, D.N. Perfilova

### Thermoplastic materials of new generation for aviation

*The article presents the most significant achievements of the All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials (FSUE «VIAM» SSC RF) for the period of 2012–2016 in the field of development of polymeric functional materials for aircraft, implemented in the framework of the «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030» [1–3].*

*The main developments in the field of thermoplastic materials are described: injection molding material VTP-7 with high antistatic properties, thermoplastic heat-resistant composite material VKU-44 and new self-extinguishing material based on polycarbonate for additive FDM-technology.*

*The main properties of the developed thermoplastic materials and recommendations for their application are presented.*

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Химпродукт» [Limited Liability Company «Himprodukt»]; e-mail: plmm@bk.ru

**Keywords:** *thermoplastics, injection molding, extrusion, pressing, processing, binder, filler, thermoplastic composite material, carbon nanotubes, 3D-printing, fused deposition modeling (FDM).*

Разработки в области термопластичных материалов проводятся в рамках стратегического направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1–3].

В последние годы термопластичные материалы благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных и технологических свойств находят все большее применение в различных отраслях машиностроения, в том числе и в авиакосмической технике [4–7]. Для термопластов характерны высокие прочностные и деформационные характеристики, низкая плотность, ударостойкость, устойчивость к различным видам химических воздействий, диэлектрические свойства, переработка экологически чистыми способами с возможностью вторичного использования промышленных отходов и т. д. [4–11]. В отличие от реактопластов эти полимеры способны обратимо переходить при нагревании в высокоэластическое или вязкотекучее состояние, что позволяет перерабатывать их в изделия различными способами (литье под давлением, экструзия, пневмо- и вакуум-формование, прессование и др.) [5–8, 12].

В летательных аппаратах данные материалы используются для изготовления деталей и изделий конструкционного и декоративно-конструкционного назначения: корпуса приборов, кронштейны, детали вентиляционной системы и пассажирских кресел, панели обслуживания, осветительные приборы, детали аудио- и электротехники (рис. 1).



Рис. 1. Литые детали краскораспылителя из термопластов

Однако в связи с увеличением скоростей полета и дальности преодолеваемых расстояний требования к термопластам ужесточились и ассортимент используемых в авиакосмической промышленности термопластичных материалов значительно сократился.

Традиционные серийно выпускаемые термопласты (термопласты общетехнического назначения): полиэтилен, полипропилен, полистирол, фторопласт – не отвечают предъявляемым в настоящее время требованиям по прочностным и пожаробезопасным характеристикам, температуре эксплуатации.

Разработанный во ФГУП «ВИАМ» *литьевого композиционный термопластичный материал марки ВТП-7* полностью отвечает современным требованиям, предъявляемым к авиакосмическим материалам. Его можно отнести к суперконструкционным термопластам нового поколения: температура эксплуатации материала превышает 180°C, он обладает высокими прочностными свойствами и полностью отвечает требованиям норм АП-25 по пожаробезопасности.

Высокий уровень технологических и эксплуатационных характеристик разработанного литьевого композиционного термопластичного материала марки ВТП-7 обусловлен составом исходных компонентов и технологией их совмещения, в том числе наличием в главной цепи ароматических колец, способствующих не только повышению их температуры стеклования (плавления) и жесткости, но и увеличению прочности при растяжении и сдвиге.

При разработке состава композиционного термопластичного материала, предназначенного для переработки в изделия высокопроизводительным способом литья под давлением, в качестве матричного полимера использовали порошковый полиарилсульфон марки ПСФФ-30. Отличительной особенностью указанной марки является наличие в ее рецептуре модификатора – фенолфталеина с кардовыми фрагментами (объемными боковыми циклическими группами в повторяющемся звене макромолекулы полисульфона), позволяющего повысить температуру стеклования материала до 10% и предел прочности при растяжении – до 35%.

Из ассортимента выпускаемых отечественной промышленностью полиарилсульфонов (изготовитель АО «Институт пластмасс») выбрали ПСФФ-30 с числом вязкости 37–45 мл/г и температурой стеклования 210°C, так как он обладает наиболее оптимальным соотношением теплоустойчивости и вязкости, что имеет большое значение при переработке методом литья под давлением. Выбор порошковой формы обусловлен возможностью получения более равномерного распределения наполнителей в композиции [6–8, 10, 12–14].

Полиарилсульфон, который является диэлектриком, модифицировали с целью изменения его электропроводности, т. е. для снятия

статического электричества, которое возникает в процессе эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на их поверхности из-за низкой электропроводности и может быть источником пожаров, что, в свою очередь, может привести к выведению отдельных узлов или всей конструкции из строя.

Одним из методов преобразования изолирующего полимера в проводящий является его наполнение проводящими частицами, такими как технический углерод, углеродное волокно, металлическое волокно (из нержавеющей стали), а также углеродные нанотрубки. Для обеспечения необходимого уровня электрических свойств ПКМ важны контактные явления на границе «наполнитель–полимер», определяющие в значительной мере электропроводность и другие электрофизические свойства материала. Образование проводящих путей в двухфазной системе зависит от способности частиц электропроводящей фазы образовывать хороший электрический контакт при их соприкосновении или сближении. С учетом огромного числа контактов между частицами, любые изменения в свойствах этих контактов оказывают сильное влияние на электропроводность материала.

Поэтому для придания полимеру функциональных (антистатических) свойств, опираясь на исследования, проводимые за рубежом, в качестве наполнителей выбраны коаксиальные многослойные углеродные нанотрубки марки «Таунит-М» и технический углерод марки П-803 [15–21]. Углеродные нанотрубки характеризуются наружным диаметром 8–15 нм и длиной  $>2$  мкм; число нанослоев одной трубки составляет 6–10; площадь удельной геометрической поверхности: 300–320 м<sup>2</sup>/г.

Введение углеродных нанотрубок осуществляли способом физической модификации, которая позволяет получить полимеры матричной структуры, основные свойства которых определяет матрица, в данном случае – полиарилсульфон (химически модифицированный полисульфон). Модификацию осуществляли путем совмещения компонентов в расплаве на лабораторном двухшнековом экструдере с приставкой RHEOSKAM (фирма SKAMEX, Франция).

Переработка литьевого самозатухающего композиционного термопластичного материала осуществляется способом литья под давлением на стандартном оборудовании – термопластавтоматах со шнековой пластикацией.

Литьевой композиционный термопластичный материал марки ВТП-7 обладает комплексом уникальных свойств:

- при температуре испытаний 20°C температура стеклования равна 202,5–218°C;
- плотность составляет 1265 кг/м<sup>3</sup>;

- прочность при растяжении равна 86,4 МПа;
- характеризуется стабильностью размеров (колебания усадки 0,05%);
- температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в диапазоне температур от -60 до +180°С равен от  $47,0 \cdot 10^{-6}$  до  $51,3 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>;
- категория горючести – самозатухающий.

Важной функциональной характеристикой материала ВТП-7 являются повышенные антистатические свойства. По сравнению с другими термопластами, которые являются диэлектриками (удельное объемное электросопротивление составляет  $\sim(10^{14}–10^{16})$  Ом·см), материал – проводник, что способствует снятию статического электричества, которое возникает в процессе эксплуатации изделий из ПКМ на их поверхности из-за низкой электропроводности (удельное объемное электросопротивление равно  $2,2 \cdot 10^5$  Ом·см).

Введение в рецептуру материала модифицирующих добавок позволило повысить жесткость полимера, снизить усадку при литье изделий и обеспечить стабильность размеров при их эксплуатации.

Разработанный материал превосходит:

– российский аналог – полисульфон марки ПСФ-150 – по температуре стеклования, пределу прочности при растяжении, рабочей температуре, ТКЛР в диапазоне температур от -60 до +180°С;

– зарубежный аналог – полисульфон марки Udel P-1700 фирмы SolvayAdvancedPolymers (США) – по температуре стеклования, пределу прочности при растяжении, ТКЛР и рабочей температуре (табл. 1).

Таблица 1

**Сравнительные свойства полисульфонов**

Свойства	Значения свойств для полисульфона марки		
	ВТП-7	ПСФ-150	Udel P-1700
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре, °С:			
20	86,4	56	72
180	44,0	–	–
Модуль упругости при растяжении, ГПа, при температуре, °С:			
20	3,3	2,5	2,4
180	2,3 (сохранение от исходного значения 66%)	–	–
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1265	1220	1240
Колебания усадки, %	0,05	–	–
Рабочая температура, °С	-60÷+180	+150	+150
Температура стеклования, °С	202,5–218	190	192
Категория горючести	Самозатухающий		

Работоспособность литьевого композиционного термопластичного материала до температуры 180°С подтверждена сохранением его прочностных свойств (предела прочности и модуля упругости при растяжении) при температуре до 180°С на уровне 50,9–66% соответственно от

исходного значения (при 20°C); размеростабильность — низкими значениями колебания усадки и ТКЛР; антистатические свойства — значениями удельного объемного электросопротивления ( $2,2 \cdot 10^5$  Ом·см).

Полисульфон марки ВТП-7 стоек к микологическому воздействию — балл обрастания грибами равен 0. Результаты испытания образцов материала демонстрируют низкое значение водопоглощения (0,85% за 30 сут), что положительно сказывается на его механических свойствах.

Сохранение значений модуля упругости и предела прочности при растяжении материала после теплового старения при 150 и 180°C в течение 500 ч, после выдержки во влажной и микологической средах в течение 3 мес, а также в воде в течение 30 сут составило соответственно 96–99 и 90–98% от исходных значений. После теплового старения при температуре 150°C в течение 1000 ч происходит незначительное упрочнение материала за счет устранения микро- и макронапряжений: модуль упругости при растяжении увеличивается на 4,5%, предел прочности при растяжении повышается на 3,9%. После тепловлажностного старения модуль упругости также повышается незначительно — на 0,8%.

Сохранение значений пределов прочности при растяжении и изгибе после теплового старения при температуре 180°C в течение 100 и 500 ч в диапазоне исходных значений прочности также подтверждает работоспособность материала при температуре до 180°C.

Высокий уровень технологических и эксплуатационных характеристик разработанного литьевого композиционного термопластичного материала марки ВТП-7 подтверждает правильность выбора исходных компонентов и технологии их совмещения.

Применение литьевого самозатухающего термопластичного композиционного материала на основе полиарилсульфона марки ВТП-7 позволит:

- исключить необходимость закупки импортного аналога — полисульфона марки Udel P-1700 фирмы SolvayAdvancedPolymers;
- снизить массу элементов и деталей конструкций в 2,1 раза по сравнению с элементами, выполненными из алюминиевых сплавов, так как плотность алюминиевых сплавов составляет  $2700 \text{ кг/м}^3$ , а плотность разрабатываемого материала  $1265 \text{ кг/м}^3$ .

На материал оформлены паспорт, технические условия, технологические инструкции на его изготовление и переработку. Материал рекомендован для применения в различных отраслях народного хозяйства: авиационной и автомобильной промышленности, судостроении, железнодорожном транспорте и т. д. (рис. 2).

Пленка из полиарилсульфона использована в качестве связующего при разработке *листового композиционного термопластичного материала марки ВКУ-44* на основе углеродного наполнителя ЭЛУР 0,08-П,



Рис. 2. Гранулы материала марки ВТП-7 (а) и детали (б, в), изготовленные из него методом литья под давлением

являющегося одним из немногих углепластиков, созданных в России и относящихся к материалам нового поколения.

Углепластики, обладая комплексом ценных свойств, таких как низкая плотность, высокий модуль упругости, прочность, термостойкость, высокая износостойкость, низкий ТКЛР, находят широкое применение в авиакосмической технике [9, 10, 12, 16, 17, 22–30].

К недостаткам углепластиков на основе как терморективного, так и термопластичного связующих, относится низкий предел прочности при сдвиге, что связано с недостаточной адгезией полимерных, особенно термопластичных, связующих к поверхности углеродных волокон (УВ). Адгезия на границе раздела «УВ–полимерная матрица» определяется наличием механических связей вследствие проникновения полимера в шероховатости поверхности УВ, химическими связями между поверхностью УВ и полимерной матрицей и взаимодействием, обусловленным действием сил Ван-дер-Ваальса [26, 27].

Необходимое для обеспечения хорошей адгезии возникновение химических связей в системе «УВ–полимер» может быть обеспечено формированием на поверхности УВ химически активных функциональных групп, способных реагировать с атомами и группами в цепочках полимера. Для улучшения смачивания УВ полимерными связующими и повышения прочности соединения, УВ подвергают поверхностной воздушной обработке или электроокислению [27].

При производстве из УВ лент, жгутов, тканей требуется применение замасливателей, в качестве которых обычно используют водорастворимые полимеры или олигомеры. Из-за трудностей удаления замасливателя с поверхности УВ он остается на волокнах при производстве углепластиков и выполняет роль аппрета.

При разработке состава листового композиционного термопластичного материала в качестве наполнителя использовали отечественную

углеродную армирующую однонаправленную ленту ЭЛУР 0.08ПА, которую получают на стадии ткачества исходных полиакрилонитрильных нитей, подвергаемых затем окислению, карбонизации и графитизации с образованием конечного углеродного продукта. Натяжение волокон в процессе преобразования полимерной структуры в углеродную обеспечивает высокую продольную прочность УВ, в то время как поперечная прочность резко снижается, проявляя впоследствии при переработке лент в изделия склонность к расщеплению.

В связи с тем, что в настоящее время в ПКМ в качестве матрицы за рубежом используют новые суперконструкционные термостойкие термопласты, обладающие высокой механической прочностью, жесткостью, химической устойчивостью, износо- и атмосферостойкостью [13–15, 22, 23, 25, 29], в данной работе роль связующего выполнял жесткоцепной термопласт, единственный выпускаемый в России, – полиарилсульфон. Использование в качестве матрицы связующих на основе гибкоцепных термопластов не позволяет реализовать свойства волокнистых высокопрочных высокомодульных армирующих наполнителей из-за низких упругопрочностных свойств гибкоцепных термопластичных матриц, не отвечающих требованиям обеспечения монолитности, а также из-за их низкой трещиностойкости.

В то же время высокие упруго-прочностные свойства, трещиностойкость, тепло-, огне-, химостойкость и радиационная стойкость жесткоцепных полиариленов и полигетероариленов обеспечиваются с помощью высокопроизводительных способов без проведения химических реакций при использовании их в качестве связующих для получения термоустойчивых конструкционных и функциональных материалов, свойства которых превосходят свойства материалов на основе традиционных терморективных связующих [13–15, 22, 25, 29].

Таким образом, по комплексу физико-механических и технологических свойств в качестве связующего выбраны полиарилсульфоны – единственные негорючие слабодымящие конструкционные термопласты, производство которых имеется в России. По прочности ( $\sigma_B > 70$  МПа) и модулю упругости ( $E = 2200$  МПа) полиарилсульфоны не уступают, а по деформативности ( $\delta_p = 7–8\%$ ) и стойкости к удару ( $\geq 100$  кДж/м<sup>2</sup>) значительно превышают свойства эпоксидных и фенолформальдегидного связующих.

Недостатком полиарилсульфонов является их высокая вязкость расплава, которая при температуре переработки (например, при 260°C) равна  $\eta = 10^4$  Па·с (для сравнения – вязкость раствора (расплава) эпоксидных и фенолформальдегидных смол  $\eta = 10^1–10^2$  Па·с). Однако, регулируя молекулярную массу полимера, от которой зависит его вязкость расплава,



можно значительно повысить степень совмещения связующего с наполнителем, что очень важно при изготовлении композиционного термопластичного материала (КТМ). Плохое качество пропитки наполнителя высоковязким расплавом связующего приводит к снижению механических свойств ПКМ.

Электронно-микроскопические исследования структуры границы раздела углепластика подтверждают плохую смачиваемость расплавом полисульфона углеродных волокон (рис. 3).

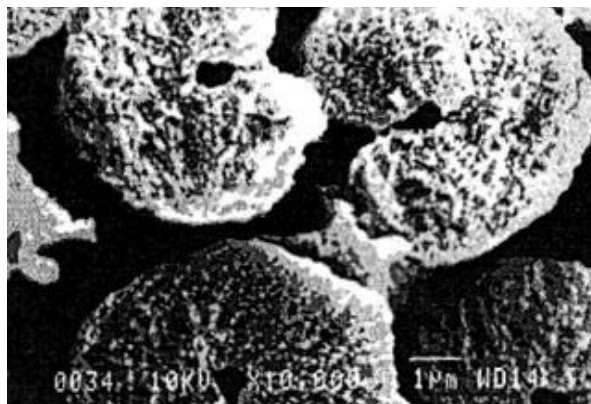


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 10000$ ) торцов волокон углепластика на основе полиарилсульфона и углеродной ленты ЭЛУР 0.08ПА

Использование полиарилсульфона в виде пленки позволило применить наиболее перспективный и экологически чистый способ его совмещения с армирующим наполнителем. Основным достоинством пленочного метода совмещения компонентов является возможность точно задавать соотношение компонентов и любые схемы армирования. Основное применение в отечественной промышленности этот метод нашел для изготовления плоских полуфабрикатов (препрегов) термопластичных стекло- и углепластиков [30–32].

На основании результатов исследований по влиянию молекулярной массы полиарилсульфона на его механические свойства и приведенную вязкость ( $\eta$ ) выбраны оптимальные значения:  $28300 \div 34000$  г/моль. Совмещение полиарилсульфоновой пленки с указанным значением молекулярной массы с волоконным наполнителем (углеродной лентой ЭЛУР 0.08ПА) позволило получить ПКМ, обладающий свойствами на уровне зарубежных аналогов.

Разработанный листовой КТМ марки ВКУ-44 имеет следующий уровень свойств:

- плотность  $1370 \text{ кг/м}^3$ ;

- предел прочности при изгибе 1095 МПа;
- категория горючести – самозатухающий (отвечает требованиям АП-25 по горючести);
- линейная усадка при прессовании 0,28%;
- ТКЛР в диапазоне температур от -60 до +180°C:  $\alpha=(1,4-1,8) \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ .

Материал марки ВКУ-44 работоспособен до температуры 150°C – сохранение значений предела прочности при растяжении при температуре до 150°C составило 95% от исходного значения (при 20°C).

Свойства углепластика в сравнении с аналогами приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Свойства листового композиционного термопластичного материала (КТМ) марки ВКУ-44 в сравнении с аналогами**

Свойства	Значения свойств КТМ		
	ВКУ-44	марки КТМУ-1	на основе угленаполнителя AS-4 и полисульфона марки Udel P-1700
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1370	1450–1480	1320–1450
Предел прочности при изгибе, МПа (при 20°C)	1095	–	1300
Линейная усадка при прессовании	0,28	–	2–3
ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6 K^{-1}$ (по ASTM E 831 и ASTM E 473) при температуре, °C	-60	1,4	0,2–5 (от -50 до +160°C)
	-50	1,5	
	0	1,5	
	+50	1,5	
	+100	1,6	
	+150	1,7	
	+180	1,8	12,6 (при 20°C)
Удельное объемное электро-сопротивление, Ом·см	$2,9 \cdot 10^{-3}$	–	$7 \cdot 10^{15}$

Способ изготовления углепластика – прямое горячее прессование по пленочной технологии.

Материал может быть использован в различных отраслях народного хозяйства: авиационной и автомобильной промышленности, судостроении, железнодорожном транспорте и т. д. (рис. 4).

Применение листового композиционного термопластичного материала марки ВКУ-44 позволит:

- снизить массу элементов и деталей в 2 раза по сравнению с элементами из алюминиевых сплавов, так как плотность алюминиевых сплавов 2700 кг/м<sup>3</sup>, а плотность разрабатываемого материала 1370 кг/м<sup>3</sup>;
- улучшить экологическую обстановку за счет исключения использования растворителя при изготовлении листового КТМ;
- исключить необходимость закупки импортного аналога КТМ на основе угленаполнителя AS-4 и полисульфона марки Udel P-1700 фирмы SolvayAdvancedPolymers.

Другим важным направлением, где с каждым годом увеличивается объем потребления термопластов, являются аддитивные технологии или

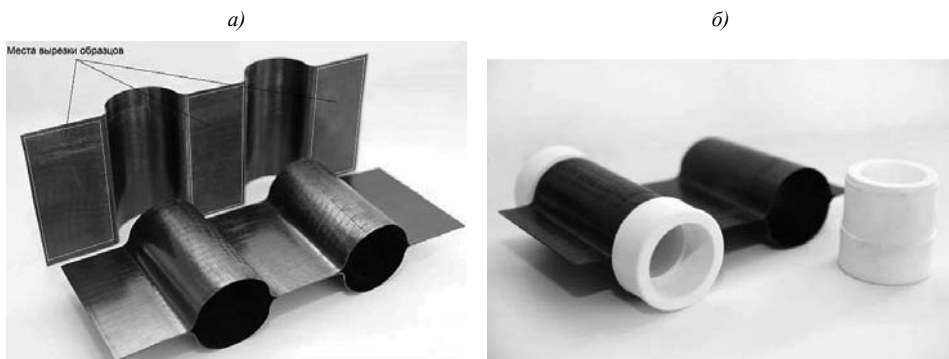


Рис. 4. Конструктивно-подобные элементы системы кондиционирования воздуха из листового композиционного термопластичного материала марки ВКУ-44, изготовленные методами: сварки (а) и склеивания (б)

технологии послойного синтеза – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Технологические процессы послойного синтеза позволяют построить прототип или физическую модель изделия сложной формы в соответствии с компьютерной 3D-моделью.

Наиболее распространенной технологией 3D-печати, особенно среди персональных и настольных 3D-принтеров, является моделирование методом наплавления – fused deposition modeling (FDM) [33].

Развитие направления FDM 3D-печати связывают не только с оптимизацией параметров синтеза (расположение детали, толщина монослоя, скорость печати и так далее), но и с решением ряда материаловедческих задач: создание материалов со специальными свойствами, снижение усадки, оптимизация реологии расплава и теплофизических свойств с учетом специфики послойного формирования объектов [34–36].

В настоящее время FDM-технология с успехом используется для создания дизайнерских прототипов, мастер-моделей для металлического литья и функциональных изделий.

В качестве расходного материала за рубежом используют термопласты. Существует большое число материалов, которые исследовали на предмет использования в 3D-принтерах, – в настоящее время используют в основном два пластика марок ABS и PLA. Оба материала – термопласты, т. е. они становятся мягкими и пластичными при нагревании, а при охлаждении затвердевают. Несмотря на большой ассортимент термопластов, для прототипирования используют лишь немногие из них. Материалы, которые проверяют на пригодность в этой области, должны пройти несколько тестов: первоначальное экструдирование пластика в нить, вторичное экструдирование и привязка к контуру детали в процессе

печати и, наконец, оценка полученного результата. Кроме того, они должны отличаться точностью изготовления, прочностью и термостабильностью, не впитывать влагу, не деформироваться и не давать усадку.

Необходимо отметить, что на рынке практически отсутствуют материалы с уникальными свойствами: с пониженной пожарной опасностью, с антистатическими свойствами, термоэластопласты и другие.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработана полимерная композиция для 3D-печати методом FDM – композиция на основе термопластичного материала – поликарбоната, модифицированного антипиреном и добавками для улучшения его текучести и снижения температуры переработки [37–40]. Разработанная композиция полностью отвечает требованиям пожарной безопасности по нормам АП-25 (Приложение F, Часть IV) по горючести и дымообразованию.

Свойства разработанной композиции в сравнении со свойствами исходного поликарбоната приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Физико-механические и пожаробезопасные свойства композиций из поликарбоната**

Свойства	Значения свойств поликарбоната марки	
	PC-007	PC-007+модификатор текучести+антипирен (ДБДФО)
Физические свойства		
Температура размягчения по ВИКА, °С	152	123
Механические свойства		
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре, °С:		
20	48,5	43,3
80	33,2	31,7
120	26,9	14,9
Относительное удлинение при разрыве, %, при температуре, °С:		
20	75,0	71,2
80	80,1	88,5
120	90,4	99,6
Предел текучести при разрыве, МПа, при температуре, °С:		
20	53,0	56,8
80	35,4	37,8
120	27,2	12,5
Относительное удлинение при пределе текучести, %, при температуре, °С:		
20	7,6	11,0
80	8,1	11,5
120	9,1	11,9
Технологические свойства		
Показатель текучести расплава, г/10 мин	5,8	7,1–10,2
Пожаробезопасные свойства		
Время остаточного горения, с	47	3
Категория горючести	Сгорающий	Самозатухающий
Кислородный индекс	26	31

Разработанная композиция имеет по сравнению с исходным поликарбонатом более высокую текучесть, показатель текучести расплава повысился в ~2 раза при введении модифицирующих добавок. Кроме того, композиция является самозатухающей и отвечает требованиям АП-25 по пожаробезопасности.

Исследованные композиции при повышенных температурах испытаний ведут себя как обычные термопласты, т. е. при повышении температуры испытания несколько снижаются прочностные и повышаются деформационные свойства материала, однако для композиции, содержащей модифицирующую добавку, эти зависимости более выражены по сравнению с исходным поликарбонатом. Однако даже при температуре испытания 120°С прочность остается на достаточно высоком уровне.

По реологическим характеристикам материал сопоставим со стандартными материалами для аддитивной FDM-технологии – типа ABS и Nylon 618, по прочностным характеристикам новый материал превосходит конструкционный материал Nylon 618 (США) для FDM-технологии – на 11,0% (табл. 4).

Таблица 4

**Сравнительные свойства образцов из материала Nylon 618 (США) и композиции на основе поликарбоната, полученных по технологии литья под давлением (ЛПД) и методом послойного синтеза по FDM-технологии**

Технология	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
Материал Nylon 618			
Литье под давлением (ЛПД)	1100	39,6	1,0
FDM-технология	1020	28,1	0,5
Сохранение свойств, %, при сравнении FDM с ЛПД	93	71	50
Модифицированный поликарбонат			
Литье под давлением (ЛПД)	1270	53,5	2,1
FDM-технология	1070	31,7	1,4
Сохранение свойств, %, при сравнении FDM с ЛПД	84	59	67

Разработанный материал может найти применение при создании функциональных изделий для интерьера авиационной техники методами 3D-печати, отвечающих требованиям АП-25 по характеристикам пожарной безопасности.

Из композиции на основе ПА-12 получена полимерная нить диаметром 1,7±0,1 мм и опробована при изготовлении сотовой конструкции (рис. 5) на 3D-принтере MagnumCreative 2 PRO по FDM-технологии.

Полученная сотовая конструкция имеет однородную, характерную для объектов, синтезированных по FDM-технологии, слоистую

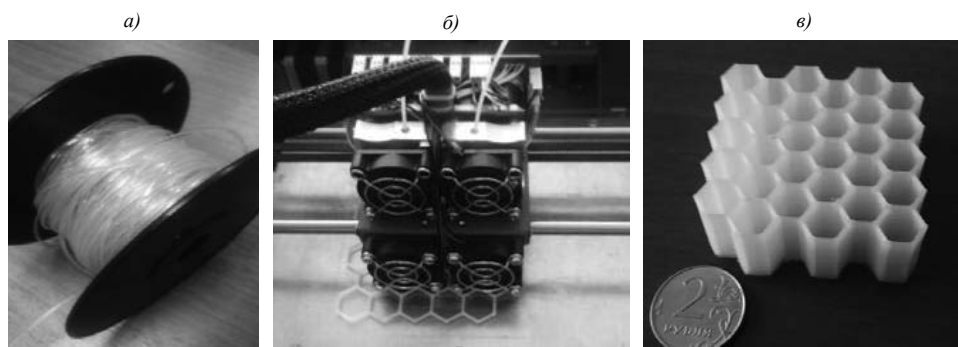


Рис. 5. Изготовление сотовой конструкции:  
 а – полимерная нить из композиции ПА-12 диаметром  $1,7 \pm 0,1$  мм;  
 б – процесс печати сотовой конструкции из композиции  
 ПА-12+3% ДБДФО; в – готовое изделие

структуру. Усадочные деформации сотовой конструкции минимальны и сопоставимы с деформациями аналогичных изделий, полученных с использованием базовых материалов типа Nylon 618 и ABS для FDM-технологии.

Таким образом, в настоящее время при разработке конкурентоспособных функциональных полимерных материалов авиационного применения недостаточно обеспечивать выполнение ими основных функций в конструкции воздушного судна. Необходимо создавать материалы с учетом многосторонних фундаментальных исследований – в том числе по старению и климатической стойкости. Необходимо учитывать вопросы экологичности технологий изготовления и применения новых материалов, использовать современные методологии компьютерного моделирования свойств и основные подходы цифрового производства. В отечественной и иностранной научно-технической литературе материалы, базирующиеся на вышеперечисленных принципах, обозначены как материалы «нового поколения» [1–2].

#### 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. информ. матер. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
4. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
5. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литые термопласты для изделий авиационной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №6. С. 10–15.
6. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2005. 240 с.
7. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н., Румянцева Т.В. Пожаробезопасные литые термопласты и термоэластопласты // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2017).
8. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе // Полимерные материалы. 2005. №4. С. 29–32.
9. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике // Полимерные материалы. 2009. №2. С. 5–9.
10. Petrova G.N., Beider E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics Chemistry and Materials Science // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 1001–1007.
11. Сударушкин Ю.К., Гудимов М.М., Романов Д.С., Соколов М.Ю. Применение литых поликарбонатов в авиаприборостроении // Авиационная промышленность. 2003. №2. С. 48–52.
12. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. С. 29–30.
13. Петрова Г.Н. Направленная модификация полисульфонов и создание на их основе литых и композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2011. С. 10–27.
14. Николаев А.Ф. Термостойкие полимеры. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1988. С. 3–11.
15. Petrova G.N., Zhuravleva P.L., Iskhodzhanova I.V., Beider E.Ya. Influence of Carbon Fillers on Properties and Structure of Polyethylene-Based Polymer Composites // Nanotechnologies in Russia. 2014. Vol. 9. No. 5–6. P. 305–310.
16. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 277–286.
17. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексашин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.

18. Li J., Kim J.K., Sham M.L., Marom G. Morphology and properties of UV/ozone treated graphite nanoplatelet/epoxy nanocomposites // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. P. 296–305.
19. Sham M.L., Li J., Ma P.C., Kim J.K. Cleaning and functionalization of polymer surfaces and nanoscale carbon fillers by UV/ozone treatment: a review // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. P. 1537–1564.
20. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. Пер с англ. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
21. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
22. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // *Известия вузов. Сер.: Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. №10. С. 61–71.
23. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 30–40.
24. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р. и др. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 38–42.
25. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №11. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2017).
26. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Дыкун М.И. Аппретирование углеродных волокон-наполнителей термопластичных карбопластиков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-3-3.
27. Варшавский В.Я. Углеродные волокна. М.: ВИНТИ, 2005. 498 с.
28. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
29. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №11. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5.



30. Головкин Г.С. Регулирование механических свойств ПКМ методами целенаправленного формирования межфазной зоны // Полимерные материалы. 2009. №11. С. 26–28.
31. Авиационное оборудование / под ред. Ю.П. Доброленского. М.: Воениздат, 1989. 248 с.
32. Постнов В.И., Плетинь И.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В., Стрельников С.В. Технологические особенности производства тонколистовых обшивок лопастей вертолета из конструкционного стеклопластика ВПС-53К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №4 (3). С. 619–627.
33. Смирнов О.И., Скородумов С.В. Моделирование технологии послойного синтеза при разработке изделий сложной формы // Современные наукоемкие технологии. 2010. №4. С. 83–87.
34. Novakova-Marcincinova L., Kuric I. Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology // Manufacturing and Industrial Engineering. 2012. Vol. 11 (1). P. 24–27.
35. Crococo D., De Agostinis M., Olmi G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behavior of fused deposition processed parts made of ABS-M30 // Computational Materials Science. 2013. Vol. 79. P. 506–518. DOI: 10.1016/j.commsci.2013.06.041.
36. Turner B., Strong R., Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyping Journal. 2014. No. 20/3. P. 192–204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012.
37. Петрова Г.Н., Платонов М.М., Большаков В.А., Пономаренко С.А. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // Пластические массы. 2016. №5–6. С. 53–59.
38. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Бейдер Э.Я. Влияние модифицирующих добавок на пожаробезопасные свойства и технологичность поликарбоната // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №6. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.02.2017).
39. Петрова Г.Н., Старостина И.В., Румянцева Т.В. Исследование возможности маркировки деталей из поликарбоната // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №10 (46). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-11-11.
40. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Полимерная композиция на основе полидодекалактама для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №10. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-9-9.