

УДК 699.81:678.073

Г.Н. Петрова¹, Ю.А. Санего¹, С.А. Ларионов¹, М.М. Платонов², А.Б. Лантнев¹**ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ 3D-ТЕХНОЛОГИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-7-7

Приведены результаты исследований пожаробезопасных термопластичных материалов, разработанных во ФГУП «ВИАМ» для использования в FDM аддитивной технологии 3D-печати. Сформулированы требования по уровню эксплуатационных и технологических характеристик, которым должны отвечать такие материалы.

Рассмотрены физико-механические, реологические и пожаробезопасные свойства разработанных термопластичных композиций на основе поликарбоната и полиамида. Приведены результаты испытаний образцов, полученных по традиционной технологии литья под давлением и инновационным способом 3D-печати. Показано, что разработанные материалы по уровню свойств и технологичности не уступают зарубежным аналогам.

Определена взаимосвязь технологических параметров послойного синтеза (температуры экструдера и камеры) и ориентации молекул в стержне полимера с точностью 3D-печати и прочностными свойствами объекта.

Полученные закономерности позволяют значительно ускорить процесс печати объектов из термопластичных материалов по FDM аддитивной технологии и повысить их качество.

Ключевые слова: поликарбонат, полиамид, пожаробезопасность, реология, вязкость расплава, 3D-печать, FDM-технология, переработка.

Results of researches of the fireproof thermoplastic materials developed in VIAM Federal State Unitary Enterprise for use in FDM of the additive technology 3D are given in article – the press. Requirements for level of utilization and technical characteristics to which such materials have to answer are formulated.

Physical-mechanical, rheological and fireproof properties of the developed thermoplastic compositions on the basis of polycarbonate and polyamide are considered. Test results of the samples received on traditional casting technology under pressure and innovative way 3D – the press are given. It is shown that the developed materials on level of properties and technological effectiveness do not concede to foreign analogs.

The interrelation between technological parameters of level-by-level synthesis of object (temperature of extrusion, camera temperature, orientation of molecules in strand) on the accuracy of the press and its strength properties is defined.

The received patterns will allow to accelerate considerably process of the press of objects of thermoplastic materials on FDM of the additive technology and to increase their quality.

Keywords: polycarbonate, polyamide, fire safety, rheology, molten viscosity, 3D-press, fused deposition modeling (FDM), processing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

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

Введение

В последние годы в различных отраслях промышленности все большее применение находят термопластичные материалы – полимеры, способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластическое либо вязкотекучее состояние [1–3].

Термопласты используются в виде волокон, для изготовления литевых и экструзионных деталей, в качестве защитно-декоративных покрытий металлов и изделий из них, в составе листовых полимерных композиционных материалов (ПКМ) и др. [1, 3–18].

Расширение областей применения данных полимеров обусловлено их высокими прочностными и деформационными характеристиками, низкой плотностью, ударостойкостью, устойчивостью к различным видам химических воздействий, диэлектрическими свойствами, технологичностью – переработка экологически чистыми способами с возможностью вторичного использования [6, 7, 19, 20]. Большой интерес представляют термопластичные материалы и для инновационных аддитивных технологий, с помощью которых переработка их в изделия осуществляется нетрадиционными способами, в том числе послойным изготовлением укладкой по заданной программе расплавленной термопластичной нити (технология FDM – fused deposition modeling). В настоящее время FDM-технология с успехом используется для создания дизайнерских прототипов, мастер-моделей для металлического литья и единичных функциональных изделий [21–28].

Однако в связи с активным внедрением термопластичных материалов во все сферы деятельности человека к ним стали предъявляться повышенные требования по уровню эксплуатационных характеристик. Так, для использования в таких отраслях, как авиастроение, ракетно-космическая техника и др. необходимым условием является соответствие материалов требованиям авиационных правил АП-25 по горючести и дымообразованию [19, 29–33]. Среди термопластов, которые используются в качестве расходных материалов в FDM аддитивной технологии 3D-печати, такие материалы отсутствуют.

Данная статья посвящена исследованию свойств пожаробезопасных термопластичных материалов на основе поликарбоната и полиамида, разработанных во ФГУП «ВИАМ» для использования в FDM аддитивной технологии 3D-печати, а также изучению их влияния на качество и точность печати изготавливаемых объектов [34, 35].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [36].

Материалы и методы

В работе использованы термопластичные композиции на основе материалов, выпускаемых отечественной промышленностью: поликарбоната (ПК) марки РС-007 (ТУ 2226-173-00203335–2007 с изменениями 1–5) производства ОАО «Казаньоргсинтез» (г. Казань) и полиамида марки ПА 12 литьевого (ОСТ 6-05-425–86) производства ООО «Анид» (г. Екатеринбург). В качестве модификатора использовали полибутилентерефталат (ПБТ), в качестве антипиренов (АП) – декабромдифенилоксид (ДБДФО) и фосфат меламин (ФМ).

Одновременно проводили испытания на термопластах зарубежного производства – ABS-пластике (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола) и полиамиде Nylon-618.

Термопластичная нить (стренга) диаметром $1,7 \pm 0,1$ мм из модифицированного поликарбоната для FDM-печати получена экструзией расплава композиции через фильеру соответствующего диаметра.

Для исследований изготовили стандартные образцы (тип 2):

– способом литья под давлением на термопластавтомате со шнековой пластикацией фирмы Arburg (Германия);

– по FDM-технологии на 3D-принтере 2 PRO фирмы MagnumCreative (Россия).

Плотность материала определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139, прочность и относительное удлинение при растяжении – в соответствии с ГОСТ 11262, модуль упругости при растяжении – по ГОСТ 9550. Реологические свойства определяли в соответствии с ГОСТ 11645 (показатель текучести расплава – ПТР). Кривые течения исследовали при помощи вискозиметра CEAST Rheo 2000 Single.

Результаты

С целью определения уровня технологических и эксплуатационных характеристик термопластичных материалов, обеспечивающих их применение в качестве расходных материалов в технологии 3D-печати, на начальном этапе работ проведены исследования материалов, которые в настоящее время наиболее часто используются в 3D-принтерах зарубежными компаниями (Stratasys Inc., Traulman 3D и др.): полилактида PLA, ABS-пластика и полиамида Nylon-618.

Изучены их реологические, физические и теплофизические свойства с помощью современных методов исследования: капиллярной вискозиметрии, ТГА, ДСК, ДМА. С помощью хроматографических методов и рентгеноструктурного анализа (РСА) определено молекулярно-массовое распределение (ММР), степень кристалличности и структура. Установлено, что все исследуемые материалы являются стандартными.

Результаты реологических исследований позволили определить температурные интервалы переработки материалов: 230–250°C – для Nylon-618; 190–210°C – для полилактида PLA; 200–260°C – для ABS-пластика. Полученные значения среднечисловой и средневесовой массы (полилактид PLA: 90190 и 183750; ABS-пластик: 44170 и 98710) подтвердили, что все исследуемые материалы являются полимерами. Значения прочностных, деформационных характеристик и усадки совпадают со значениями приведенных литературных (научных) данных.

На основании полученных результатов впервые сформулированы основные требования к материалам для FDM аддитивной технологии печати по уровню технологических и эксплуатационных свойств (табл. 1).

Таблица 1

Требования к материалам, предназначенным для использования в FDM аддитивной технологии 3D-печати

| Технологические свойства | Эксплуатационные свойства |
|--|--|
| Термостабильность | Точность изготовления и отсутствие деформирования |
| Содержание минимального количества влаги и летучих | Минимальная усадка |
| Температура переработки должна быть ниже температуры начала деструкции | Высокая прочность, ударная вязкость и эластичность |
| Вязкость расплава при температурах от 190 до 260°C – в диапазоне 80÷2000 Па·с | Стойкость к воздействию влаги |
| Способность образования нити при экструдировании полимера | Пожаробезопасность – для ответственных и специальных деталей |
| Полимер или полимерная смесь | Долговечность |
| Аморфный или кристаллический | Стойкость к воздействию прямого солнечного света |
| Стереорегулярная структура или разветвленная | Способность к окрашиванию |
| Средняя молекулярная масса – от нескольких десятков тысяч до сотен тысяч единиц | Отсутствие токсических веществ при переработке |
| Способность термопласта обратимо перейти при нагревании в высокоэластическое либо вязкотекучее состояние | Экологичность и низкая стоимость (для ответственных и специальных деталей могут быть исключения) |

Анализ свойств термопластичных материалов показал, что для использования в FDM аддитивной технологии 3D-печати пригодны практически все термопласты, выпускаемые отечественной промышленностью. Однако в связи с возросшими требованиями к материалам, применяемым как в авиакосмической, так и других отраслях народного хозяйства, необходима модификация рецептур серийно выпускаемых термопластичных полимеров с целью повышения их пожаробезопасных характеристик.

Поэтому на следующем этапе проведены работы по модификации рецептур термопластичных материалов, выпускаемых отечественной промышленностью, с целью придания им функциональных свойств (пожаробезопасности и технологичности), обеспечивающих расширение области их применения при использовании в 3D-печати. Изучена совместимость модифицирующих (технологических и антипиренирующих) добавок с полимерной матрицей (ПК и ПА 12) с помощью ТГА и ДСК. Показана эффективность введения АП в рецептуру разработанных композиций и установлена зависимость их свойств от концентрации АП.

На основании результатов проведенных исследований разработаны составы термопластичных композиций с повышенной пожаробезопасностью для FDM-технологии 3D-печати. В табл. 2 и 3 приведены свойства разработанных композиций.

Таблица 2

Пожаробезопасные свойства разработанных композиций

| Показатель | Значения свойств для композиции | |
|---|---------------------------------|----------|
| | ПК марки РС-007+ПБТ+ДБДФО | ПА 12+ФМ |
| Продолжительность остаточного горения, с | 0 | 0–1 |
| Категория горючести | Самозатухающий | |
| Максимальное дымообразование (режим горения), отн. ед. | 193–195 | 126–160 |
| Категория | Среднедымящий | |
| Кислородный индекс | 31 | 26–28 |
| Тепловыделение – максимальное за 2 мин, (Вт·мин)/м ² | 165 | 273–286 |

Таблица 3

Физико-механические свойства композиции на основе поликарбоната

| Показатель | Значения свойств |
|--|------------------|
| Прочность при растяжении, МПа | 43,3 |
| Относительное удлинение при растяжении, % | 71,2 |
| Предел текучести при разрыве, МПа | 56,8 |
| Относительное удлинение при пределе текучести, % | 11,0 |
| Температура размягчения по Вика, °С | 123 |
| Показатель текучести расплава, г/10 мин | 7,1–10,2 |

Композиции являются самозатухающими, среднедымящими, имеют кислородный индекс >27, что соответствует требованиям АП-25. Композиция на основе ПК имеет высокие прочностные и деформационные характеристики, технологична и имеет достаточно высокое значение теплостойкости: 123°С (табл. 3).

Изучено влияние технологии переработки на физико-механические свойства разработанных композиций в сравнении с материалами, рекомендованными предприятиями-изготовителями оборудования. Установлено, что значение прочности при растяжении для образцов, изготовленных из разработанных композиций методом послойного синтеза по FDM аддитивной технологии на 3D-принтере, сохраняется на уровне 59%

по сравнению со значением характеристики для образцов, изготовленных традиционным методом литья под давлением, значение модуля упругости при растяжении сохраняется на уровне 67%, что находится на уровне значений для зарубежных аналогов (табл. 4–6).

Таблица 4

Сравнительные свойства образцов из разработанной композиции ПК+ПБТ+ДБДФО, полученных по традиционной технологии литья под давлением (ЛПД) и методом послойного синтеза по FDM-технологии

| Технология литья | | Плотность, кг/м ³ | Прочность при растяжении, МПа | Модуль упругости при растяжении, ГПа |
|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| ЛПД | | 1270 | 53,5 | 2,1 |
| FDM | заполнение 100% | 1070 | 31,7 | 1,4 |
| | сохранение свойств, % | 84 | 59 | 67 |

Таблица 5

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

| Технология литья | | Плотность, кг/м ³ | Прочность при растяжении, МПа | Модуль упругости при растяжении, ГПа |
|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| ЛПД | | 1100 | 39,6 | 1,0 |
| FDM | заполнение 50% | 810 | 18,7 | 0,3 |
| | сохранение свойств, % | 74 | 47 | 30 |
| | заполнение 100% | 1020 | 28,1 | 0,5 |
| | сохранение свойств, % | 93 | 71 | 50 |

Таблица 6

Сравнительные свойства образцов, полученных методом послойного синтеза по FDM-технологии из разработанной композиции ПК+ПБТ+ДБДФО и полиамида Nylon-618

| Материал | Прочность при растяжении, МПа | Квота преимущества, % |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|
| ПК+ПБТ+ДБДФО | 31,7 | 11,4 |
| Nylon-618 (США) | 28,1 | |

С целью повышения качества печати разработанными материалами и повышения уровня прочностных свойств FDM-объектов изучена зависимость реологических характеристик термопластов (ABS-пластик, Nylon-618, ПК+ПБТ+АП) от температуры их переработки, которые определяли на 3D-принтере Magnum Pro по способности прохождения термопластичной нити через сопло принтера:

| Материал | Температура переработки, °С |
|----------------------|-----------------------------|
| ABS-пластик | 200–280 |
| Nylon-618 | 240–280 |
| Композиция ПК+ПБТ+АП | 240–280 |

Установлено, что все материалы демонстрируют псевдопластичный характер течения: вязкость снижается при возрастании скорости сдвига. Увеличение температуры переработки приводит к снижению вязкости материала. Анализ кривых течения материалов показал, что значения вязкости при температурах 240, 260 и 280°С у композиции на основе модифицированного ПК выше, чем у ABS-пластика и полиамида Nylon-618.

При минимальных температурах переработки (печати) значения вязкости расплава всех исследуемых материалов – от 2,0 до 2,8 Па·с (рис. 1).

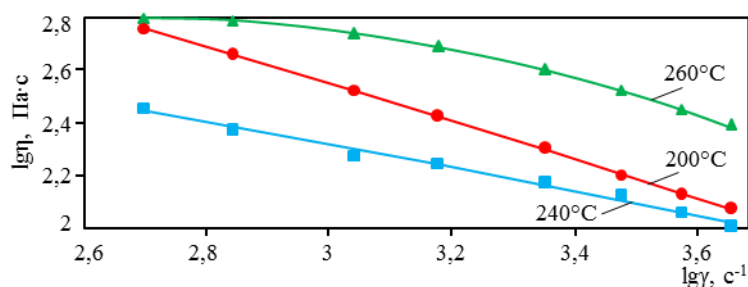


Рис. 1. Кривые вязкости для ABS-пластика (●), Nylon-618 (■) и ПК+ПБТ+АП (▲) при минимальных температурах переработки

Исследовано влияние реологических свойств материалов на размерную стабильность и физико-механические свойства 3D-объектов. Поскольку реологические свойства зависят от температуры печати, то исследована зависимость данных параметров от температуры печати. Установлено, что разработанная композиция обладает наиболее высоким уровнем свойств при температурах 260 и 280°C, что подтверждает правильность выбора оптимальных температур для печати изделий на 3D-принтере (рис. 2).

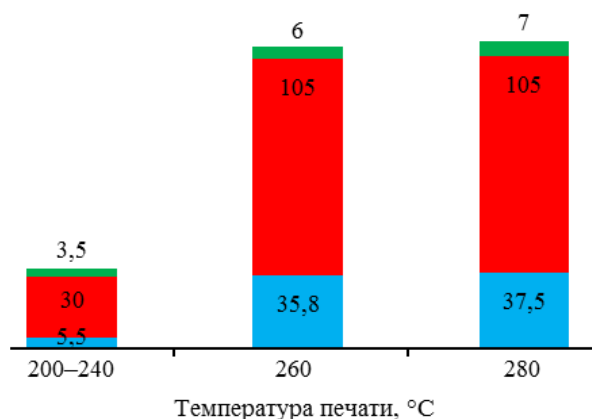


Рис. 2. Влияние температуры 3D-печати для композиции ПК+ПБТ+АП на механические свойства:

■ – относительное удлинение при растяжении, %; ■ – модуль упругости при растяжении, ГПа; ■ – прочность при растяжении, МПа

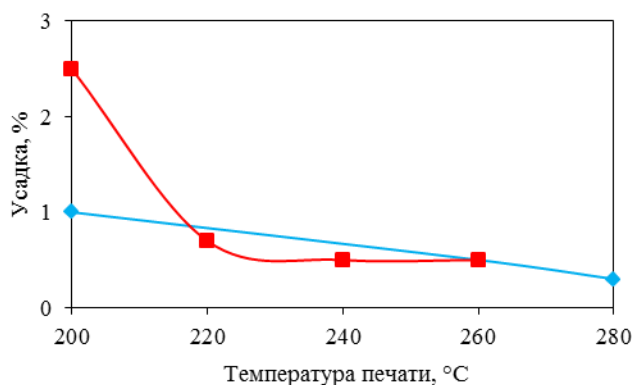


Рис. 3. Влияние температуры 3D-печати на усадку модифицированного ПК (◆) и ABS-пластика (■)

Из двух исследуемых термопластов наибольшая усадка у ABS-пластика, который плохо сохраняет заданную геометрическую форму (рис. 3). У всех полученных объектов с повышением температуры усадка сначала снижается, затем стабилизируется в температурном диапазоне переработки, что также подтверждает правильность выбора режима 3D-печати, который обеспечивает получение качественных изделий.

Для определения взаимосвязи технологических параметров послойного синтеза объекта (температуры экструдера и камеры) и ориентации молекул в стренге полимера с точностью 3D-печати и прочностными свойствами объекта напечатаны образцы с ориентацией (укладкой) молекул в стренге при печати:

- ± 45 град относительно оси образца с разрешением печати 0,1 и 0,2 мм;
- ± 90 град относительно оси образца с разрешением печати 0,1 и 0,2 мм;
- в виде кривой Гилберта.

В качестве адгезионного слоя на подложке принтера из силикатного стекла использовали раствор ABS-пластика в ацетоне (с последующим упариванием), который предотвращает отслаивание детали по контуру от подложки (подложку нагревали до 100°C – для компенсации усадочных напряжений в процессе печати).

Установлено, что образцы с послойной ориентацией ± 45 град имеют наиболее высокий уровень свойств: прочность при растяжении 38 МПа, модуль упругости при растяжении 1400 МПа, относительное удлинение при растяжении 5,5%, минимальная усадка 0,5% и максимальная плотность 1009 кг/м^3 , что значительно повышает качество печати (табл. 7). При укладке молекул в стренге под углом ± 90 град (квазиизотропная укладка), молекулы ориентированы перпендикулярно оси и при растяжении не работают, поэтому значения свойств образцов, изготовленных этим методом, ниже. При укладке в виде кривой Гилберта расположение молекул в стренге хаотичное (особенность укладки – повышенное содержание пор). Наличие этих двух факторов приводит к снижению физико-механических свойств образцов.

Таблица 7

**Влияние ориентации молекул на физико-механические свойства
и размеростабильность 3D-объектов**

| Способ укладки молекул в стренге | Плотность, кг/м^3 | Прочность при растяжении, МПа | Модуль упругости при растяжении, МПа | Относительное удлинение при растяжении, % | Усадка, % |
|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---|-----------|
| ± 45 град относительно оси образца | 1009 | 38 | 1400 | 5,5 | 0,5 |
| ± 90 град относительно оси образца | 996 | 30 | 1050 | 4,5 | 0,7 |
| Кривая Гилберта | 1001 | 32 | 900 | 4,0 | 1,0 |

Способ укладки молекул в стренге под углом ± 45 град относительно оси образца является оптимальным.

Таким образом, если температура печати оказывает незначительное влияние на физико-механические свойства объекта, то от ориентации молекул в стренге зависит не только уровень физико-механических свойств, но и качество, и точность 3D-печати.

Обсуждение и заключения

Результаты исследований позволили установить закономерности влияния технологических параметров процесса 3D-печати методом послойного синтеза на механические свойства и размеростабильность напечатанных объектов.

Эти знания применены при разработке 3D-печати методом послойного синтеза модельной оснастки для изготовления тонкостенных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов (рис. 4).



Рис. 4. Элементы модели (а) и модель (б) отливок для алюминиевого и магниевого литья

В результате выполнения данного проекта разработаны отечественные термопластичные материалы с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната и полиамида для 3D-печати.

Изучение реологических свойств термопластов позволило определить оптимальные режимы их переработки, обеспечивающие размеростабильность, высокие физико-механические показатели и точность 3D-печати объектов, создаваемых по FDM аддитивной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта №14-29-10186 офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе // Полимерные материалы. 2005. №4. С. 29–32.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
5. Сударушкин Ю.К., Гудимов М.М., Романов Д.С., Соколов М.Ю. Применение литьевых поликарбонатов в авиаприборостроении // Авиационная промышленность. 2003. №2. С. 48–52.
6. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литьевые термопласты для изделий авиационной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №6. С. 10–15.
7. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
8. 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.

9. 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.
10. 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).
11. 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: 12.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-3-3.
12. Сорокин А.Е., Бейдер Э. Я., Перфилова Д.Н. Влияние климатических факторов на свойства углепластика на полифениленсульфидном связующем // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №1. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-10-10.
13. 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: 12.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5.
14. Назаров В.Г., Столяров В.П., Петрова Г.Н., Грязнов В.И., Бузник В.М. Особенности поверхностного фторирования термоэластопластов на основе полиуретана и его влияние на свойства полимера // *Перспективные материалы*. 2016. №2. С. 52–60.
15. Грязнов В.И., Петрова Г.Н., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. Смесевые термоэластопласты со специальными свойствами // *Авиационные материалы и технологии* 2014. №1. С. 25–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-25-29.
16. Сорокин А.Е., Краснов А.П., Зюзина Г.Ф. и др. Строение и свойства высокомолекулярного литьевого полиарилата // *Пластические массы*. 2012. №1. С. 8–12.
17. 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.
18. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
19. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Платонов М.М., Перфилова Д.Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // *Авиационные материалы и технологии* 2017. №S. С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.
20. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паняматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2005. 240 с.
21. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. №2 (11). С. 52–55.
22. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 58. Iss. 4. DOI: 10.2478/amm-2013-0186.
23. Novakova-Marcincinova L., Novak-Marcincin J. Verification of mechanical properties of abs materials used in FDM rapid prototyping technology // *Proceedings in Manufacturing Systems*. 2013. Vol. 8. Iss. 2. P. 87–92.
24. Смирнов О.И., Скородумов С.В. Моделирование технологии послойного синтеза при разработке изделий сложной формы // *Современные наукоемкие технологии*. 2010. №4. С. 83–87.
25. Lužanin O., Movrin D., Plančak M. Experimental investigation of extrusion speed and temperature effects on arithmetic mean surface roughness in FDM built specimens // *Journal for Technology of Plasticity*. 2013. Vol. 38. No. 2. P. 179–191.
26. Barnatt C. 3D printing: the next industrial revolution. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. P. 8–20.
27. 3D systems corporation: annual report. Washington D.C., 2012. P. 2.

-
28. Canessa E., Fonda C., Zennaro M., Ranellucci A. Low-cost 3D printing // *Reprap, Slic3r and the Future of 3D Printing* / ed. by A. Ranellucci. Trieste, 2013. P. 75–78.
 29. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 1. Испытания на горючесть. Влияние толщины образца на регистрируемые характеристики // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. №1. С. 40–49.
 30. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 2. Испытания на горючесть – влияние продолжительности экспозиции пламенем горелки // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. №3. С. 13–24.
 31. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 3. Испытания на дымообразование – влияние толщины монолитного образца полимерного композиционного материала // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. №4. С. 7–23.
 32. Михайлин Ю.А. Показатели огнестойкости ПМ и методы их определения // *Полимерные материалы*. 2011. №8. С. 32–34.
 33. 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).
 34. 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 (46). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-9-9.
 35. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Оптимизация состава полимерной композиции с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. №1. С. 87–94.
 36. 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.