

Для цитирования:

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. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 1. С. 87–94.

For citation:

Platonov M.M., Petrova G.N., Larionov S.A., Barbotko S.L. Optimization of low flammable polycarbonate based on polymeric composition for molten thread 3D-printing technology. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 1. P. 87–94.

УДК: 678.073

М.М. Платонов, Г.Н. Петрова, С.А. Ларионов, С.Л. Барботько

Максим Михайлович Платонов (✉), Галина Николаевна Петрова, Сергей Александрович Ларионов
Лаборатория «Полимерные материалы со специальными свойствами», Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, ул. Радио, 17, Москва, Российская Федерация, 105005

E-mail: admin@viam.ru, plmm@bk.ru, petrovagn@viam.ru (✉)

Сергей Львович Барботько

Лаборатория «Климатические, микробиологические исследования и испытания на пожаробезопасность», Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, ул. Радио, 17, Москва, Российская Федерация, 105005

E-mail: slbarbotko@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ С ПОНИЖЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОНАТА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ РАСПЛАВЛЕННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ НИТЬЮ

В статье представлены результаты оптимизации состава термопластичной полимерной композиции с целью создания нового материала с пониженной пожарной опасностью для технологии 3D печати расплавленной полимерной нитью. На основании проведенных исследований показано, что композиция на основе поликарбоната, содержащая в своем составе модификатор реологии и антипирен, обладает вязкостью, сопоставимой с используемыми для 3D печати материалами, такими как ABS-пластик и Nylon-618, а также улучшенными характеристиками пожарной опасности. Полученные результаты могут найти применение при создании функциональных изделий для интерьера авиационной техники методами 3D печати, отвечающих требованиям АП-25 по характеристикам пожарной опасности.

Ключевые слова: поликарбонат, полибутилентерефталат, 3D печать, fused deposition modeling (FDM), характеристики пожарной опасности

M.M. Platonov, G.N. Petrova, S.A. Larionov, S.L. Barbotko

Maxim M. Platonov (✉), Galina N. Petrova, Sergey A. Larionov

Laboratory of Polymer Materials with Special Properties, All-Russian scientific research institute of aviation materials, Radio st., 17, Moscow, 105005, Russia

E-mail: admin@viam.ru (✉), plmm@bk.ru, petrovagn@viam.ru

Sergeiy L. Barbotko

Laboratory of Climatic, Microbiological Researches and Tests for Fire Safety, All-Russian scientific research institute of aviation materials, Radio st., 17, Moscow, 105005, Russia

E-mail: slbarbotko@yandex.ru

OPTIMIZATION OF LOW FLAMMABLE POLYCARBONATE BASED ON POLYMERIC COMPOSITION FOR MOLTEN THREAD 3D-PRINTING TECHNOLOGY

This article contains results of composition optimization of thermoplastic polymeric mixture for the development of new low flammable material for molten thread 3D-printing technology. In order to receive qualitative polycarbonate - main material for aviation purpose functional products- a couple of tasks were solved – namely decreasing of polycarbonate melt viscosity and flammability characteristics. On the first step polybutylene terephthalate (PBT) and ABS-plastic were used for decreasing in polymeric melt viscosity. Both PBT and ABS have low viscosity melts. Incorporation of these substances into polycarbonate leads to decreasing in effective viscosity and consequently in processing temperature. On a second step the influence of halogenated fire retardant decabrombiphenyl oxide (DBDFO) in amount of 3-10% on flammability characteristics (combustibility, smoke generation, oxygen index, heat release intensity) of researched mixtures was investigated. Fire retardant incorporation allows decreasing the duration of residual burning from 22 to 1-3 s and thus, transferring material from burning to self-extinguishing type. Investigation of smoke generation shows that all mixtures belong to III group of medium fumed materials with smoke generation properties not exceeding upper level (for this group) – 200 units. Besides, it has been shown that incorporation of DBDFO permits to decrease maximum velocity of heat liberation, 18-40% reduce total amount of liberated heat during first two minutes and 26-40% increase in the time of maximum reaching. It has been figured out that increasing in fire retardant amount leads to insignificant increasing in strength properties, decreasing in tensile strength and deformation characteristics. This may be explained by the presence of fire retardant fractions having lower level strength and deformation properties. In this way basing on the conducted studies it has been shown that polycarbonate mixture comprising rheology modifier and fire retardant possesses viscosity similar as 3D-printing suitable materials (ABS, Nylon-618) and advanced flammability characteristics. Investigation results may be used for creating of aviation interior functional products satisfying to Aviation Rules standards for fire hazard and capable for recycling by 3D-printing technology.

Key words: polycarbonate, polybutylene terephthalate, 3D-printing, fused deposition modeling, flammability characteristics

ВВЕДЕНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2.: Конструкционные ПКМ («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г») [1-4]. Проблема со-

здания новых термопластичных полимерных материалов с пониженной пожарной опасностью, бесспорно, является актуальной в связи с активным внедрением полимерных материалов во многие сферы деятельности человека, в том числе в области, где требования к пожаробезопасности

являются определяющими (например, авиастроение, ракетно-космическая техника, автомобилестроение) [5-12]. С другой стороны, помимо классических методов переработки термопластов, таких как литье под давлением и экструзия, в последнее время активно развиваются аддитивные технологии переработки [13-14]. Например, технология послойной укладки расплавленной полимерной нити [15-16], имеющая в англоязычной и отечественной литературе аббревиатуру FDM (fused deposition modeling).

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 [17-23].

На сегодняшний день FDM технология с успехом используется для создания дизайнерских прототипов, мастер моделей для металлического литья и функциональных изделий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе были использованы следующие термопластичные полимерные материалы: поликарбонат (ПК) марки PC-007 (ТУ 2226-173-00203335-2007.) производства ОАО «Казаньоргсинтез» (г. Казань), полибутилентерефталат (ПБТ), сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС-пластик). В качестве антипирена использован декабромдифенилксид (ДБДФО).

Получение полимерных композиций для проведения испытаний осуществлялось с использованием лабораторного двухшнекового экструдера фирмы Scamex (Франция). Образцы для проведения механических испытаний изготавливались как методом литья под давлением на термопластавтомате ARBURG ALLROUNDER 320C, так и на FDM принтере Magnum Creative 2 PRO. Полимерная нить (стренга) для FDM печати диаметром $1,7 \pm 0,1$ мм была получена экструзией расплава композиции через фильеру соответствующего диаметра.

Реологические свойства изучали в соответствии с ГОСТ 11645 (показатель текучести расплава – ПТР) и с использованием вискозиметра CEAST Rheo 2000 Single. Температуру размягчения по ВИКа определяли в соответствии с ГОСТ 15065, механические свойства – по ГОСТ 11262. Плотность определяли методом гидростатическо-

го взвешивания по ГОСТ 15139-69, прочность при растяжении – в соответствии с ГОСТ 11262-80, модуль упругости при растяжении – по ГОСТ 9550-81.

Испытания по определению характеристик горючести термопластичных композиций проводили в камере АА07 в соответствии с требованиями АП 25 Приложение F Часть I, ОСТ1 90094. Сущность метода заключается в воздействии пламени горелки на образец в течение заданного времени и установлении нормируемых характеристик после удаления источника воспламенения.

Испытания по определению характеристик дымообразования проводили в дымовой камере SD 1С (фирма «GOVMARK», США) в соответствии с требованиями АП 25 Приложение F часть V, ГОСТ 24632. Метод основан на определении удельной оптической плотности дыма при термическом разложении образца материала на основании измерения интенсивности светового потока, проходящего через задымленное пространство в испытательной камере. Испытания проводили при тепловом потоке на образец, равном 25 кВт/м^2 . Контролируемые параметры: оптическая плотность дыма за 2, 4 мин и максимально достигаемая в процессе эксперимента.

Кислородный индекс определяли на установке FTT 100 OI фирмы —Fire Testing Technology Limited, Великобритания. Сущность метода заключается в определении минимальной концентрации кислорода в потоке смеси кислорода с азотом, необходимой для поддержания процесса свечного горения образца.

Испытания по определению характеристик тепловыделения проводили в проточном калориметре типа OSU на установке HRR-3 согласно требованиям АП 25 Приложение F часть IV, СТБ 1-595-20-341. Метод основан на определении количества выделившегося тепла при горении образца под воздействием внешнего теплового потока. Испытания проводили при падающем тепловом потоке на образец, равном 35 кВт/м^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью получения качественного материала на основе поликарбоната для функциональных изделий авиационного назначения, отвечающих нормам АП-25 по пожарной опасности и перерабатываемых FDM технологиями аддитивного синтеза, были решены следующие задачи:

- снижение вязкости расплава поликарбоната;
- снижение характеристик пожарной опасности поликарбоната.

При температуре 240-260 °С поликарбонат имеет высокую вязкость расплава, поэтому его переработка на FDM принтере возможна при температуре выше 280 °С, при этом деструкция полимера становится значительной. Поскольку, одним из продуктов деструкции является Бисфенол А, который в 2010 г был официально признан вредным для здоровья, применение поликарбоната при повышенных температурах более 270 °С в настольных FDM принтерах может оказать отрицательное воздействие на здоровье.

На первом этапе для снижения вязкости расплава полимера были опробованы полибутилентерефталат (ПБТ) и сополимер акрилонитрил/бутадиен/стирол (АБС) пластик. И ПБТ, и АБС имеют низкую вязкость расплава. При введении указанных технологических добавок в поликарбонат снижаются эффективная вязкость и, как следствие, температура переработки. Результаты исследования влияния модифицирующих добавок на показатель текучести расплава при 280 °С и нагрузке 2,16 кг и горючесть композиций на основе поликарбоната представлены в табл. 1

Таблица 1

Влияние модифицирующих добавок на горючесть и реологические свойства композиций на основе поликарбоната

Table 1. The modifiers influence on flammability and rheological properties of polycarbonate based mixtures

ПК + технологическая добавка в количестве, %		Продолжительность остаточного горения, с	ПТР, г/10мин (Т = 280 °С, Р = 2,16 кг)
Исходный ПК	0	≥28	11,1
АБС	10	21	19,8
	15	18	22,8
ПБТ	10	22	18,3
	15	19	22,1

Было установлено, что при введении модифицирующих добавок не происходит улучшения пожаробезопасных свойств: все исследованные композиции, как и исходный ПК, являются сгорающими. В то же время, введение данных добавок (АБС, ПБТ) оказывает значительное влияние на текучесть композиций, причем с повышением содержания добавок в композиции (с 10 до 15%) текучесть композиций увеличивается, что позволит снизить температуру переработки композиций до 240-260 °С. При содержании добавок в количестве 25% текучесть оказалась настолько высокой, что при указанных условиях испытаний измерить ее не удалось.

На втором этапе было изучено влияние галогенсодержащего антипирена – декабромдифени-

локсида (ДБДФО) на характеристики пожарной опасности (горючесть, дымообразование, кислородный индекс, интенсивность тепловыделения) исследуемых композиций. Результаты исследования влияния концентрации ДБДФО в составе композиции ПК + 10% ПБТ на характеристики пожарной опасности представлено на рис. 1-3 и табл. 2

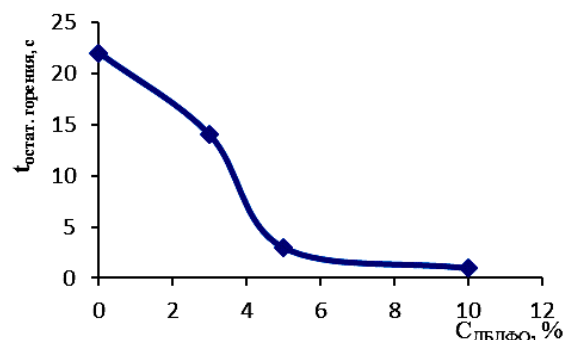


Рис. 1. Зависимость горючести композиций состава (90-Х)% ПК+10% ПБТ+ Х% ДБДФО от концентрации антипирена
Fig. 1. Dependence of flammability of [(90-Х)% PC+10% PBT+ Х% DBDFO] mixture compositions on fire retardant concentration

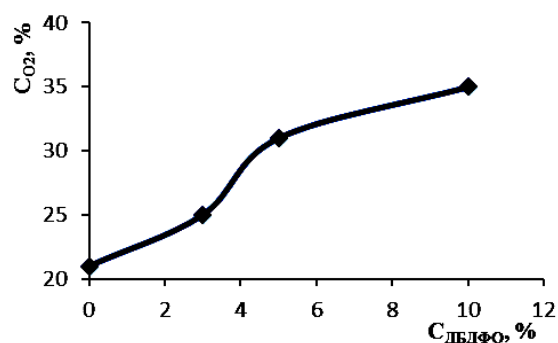


Рис. 2. Зависимость кислородного индекса композиций состава (90-Х)% ПК+10% ПБТ+ Х% ДБДФО от концентрации антипирена

Fig. 2. Dependence of oxygen index of [(90-Х)% PC+10% PBT+ Х% DBDFO] mixture compositions on fire retardant concentration

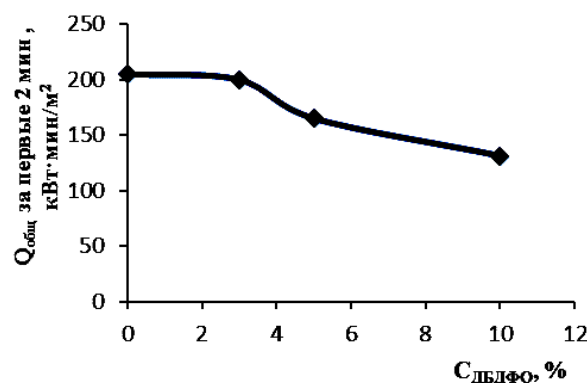


Рис. 3. Зависимость тепловыделения композиций состава (90-Х)% ПК+10% ПБТ+ Х% ДБДФО от концентрации антипирена
Fig. 3. Dependence of heat release of [(90-Х)% PC+10% PBT+ Х% DBDFO] mixture compositions on fire retardant concentration

На рис. 1 показано, что в исходном состоянии композиция является сгорающей. Введение антипирена позволяет снизить продолжительность остаточного горения с 22 до 1-3 с и осуществить переход из класса сгорающих материалов в самозатухающие.

Исследование дымообразования (табл. 2) показывает, что все композиции входят в III группу – группу среднедымящих материалов: показатели дымообразования не превышают максимального значения для данной группы - 200 ед. Но указанные показатели несколько увеличиваются при введении антипирена, что является ожидаемым фактом – бромсодержащие антипирены повышают содержание дыма в композиции. Однако, введение ДБДФО в композицию в количестве до 10 % не отражается на категории (группе) по дымообразованию.

Таблица 2

Зависимость дымообразования композиции от содержания ДБДФО
Table 2. Dependence of mixture smoke generation on DBDFO content

Исходные компоненты	Режим испытания	Показатели дымообразования, сред.		
		D_2	D_4	D_{max}
90% ПК + 10% ПБТ без антипирена	горение	11-21	29-41	90-98
	пиролиз	2-5	10-14	53-65
87% ПК + 10% ПБТ + 3% ДБДФО	горение	29-35	79-89	171-180
	пиролиз	4-7	12-16	73-85
85% ПК + 10% ПБТ + 5% ДБДФО	горение	43-72	87-134	193-194
	пиролиз	5-8	16-23	100-103
80% ПК + 10% ПБТ + 10% ДБДФО	горение	75-90	95-150	200-205
	пиролиз	10-15	18-30	120-134

Из полученных результатов (рис. 2) видно, что оптимальным количеством антипирена для композиции на основе поликарбоната является 5-10%, так как для обеспечения самозатухания материала значение кислородного индекса должно превышать 27%.

Характеристика тепловыделения является наиболее жестким для допуска материалов к использованию в отделке салона и является одним из основных требований, предъявляемых к листовым полимерным композиционным материалам. Для литевых материалов, к которым также можно отнести детали, выращенные по технологии FDM, требования по тепловыделению не предъявляются, но в данной работе такие исследования

были проведены с целью оценки эффективности влияния антипирена. Поэтому приведенные на рис. 3 данные носят относительный характер. Испытания показали, что введение антипирена ДБДФО в состав композиций позволяет снизить максимальную скорость выделения тепла и общее количество выделившегося тепла за первые две минуты на 18-40% и повысить время достижения максимума на 26-40%.

Таблица 3

Влияние концентрации антипирена на прочностные и деформационные характеристики термопластичных композиций на основе ПК и ПБТ
Table 3. The fire retardant concentration influence on strength and deformation characteristics of thermo-plastic PC and PBT based mixtures

Исходные компоненты	Предел текучести при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
90% ПК + 10% ПБТ без антипирена	53,1	9,1	48,3	98,2
88,5% ПК + 10% ПБТ + 1,5% ДБДФО	53,5	10,8	47,6	86,7
87% ПК + 10% ПБТ + 3% ДБДФО	54,3	11,0	45,5	78,8
85% ПК + 10% ПБТ + 5% ДБДФО	56,8	11,0	43,3	71,2
80% ПК + 10% ПБТ + 10% ДБДФО	57,9	11,3	41,2	35

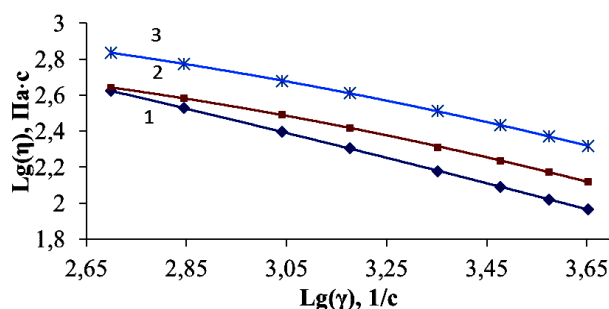


Рис. 4. Сравнительная диаграмма вязкостей материалов при T=240 °C: 1-ABS; 2- Nylon 618; 3- ПК+полиэфир+5% ДБДФО
Fig. 4. Comparative viscosity chart of materials at 240 °C: 1-ABS; 2- Nylon 618; 3- PC+polyester+5% DBDFO

Влияние концентрации антипирена на механические характеристики композиции на основе ПК и полиэфира представлены в табл. 3. Показано, что с повышением содержания антипирена прочностные свойства при текучести композиции незначительно повышаются, прочность при растяже-

Таблица 4

Сравнительные свойств образцов из материала Nylon-618 (США) и композиции 85%ПК+10%ПБТ+5%ДБДФО, полученных по технологии литья под давлением (ЛПД), и методом послойного синтеза по FDM технологии

Table 4. Comparative properties of Nylon-618 (USA) and [85% PC + 10%PBT + 5% DBDFO] mixture composition, prepared according to injection molding and fused deposition modeling techniques

Технология	Показатели свойств	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
Nylon 618				
Литье под давлением (ЛПД)		1100	39,6	1,0
Технология FDM	заполнение 100 %	1020	28,1	0,5
	сохранение свойств в сравнении с ЛПД, %	93	71	50
85%ПК+10%ПБТ+5%ДБДФО				
Литье под давлением (ЛПД)		1270	53,5	2,1
Технология FDM	заполнение 100 %	1070	31,7	1,4
	сохранение свойств в сравнении с ЛПД, %	84	59	67

нии и деформационные характеристики снижаются, что можно объяснить наличием фракций ан-

типирена, обладающих более низким уровнем прочностных и деформационных характеристик.

На вискозиметре CEAST Rheo 2000 Single были исследованы реологические свойства разрабатываемого материала. На рис. 4 показано, что композиции на основе поликарбоната, благодаря проведенной модификации, по реологическим свойствам сопоставимы с базовыми импортными материалами для FDM (ABS, Nylon 618).

В дальнейшем было проведено изучение влияния технологии переработки материалов (литье под давлением и FDM) на основные физико-механические характеристики (табл. 4).

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований предложена новая термопластичная композиция, отвечающая требованиям пожарной опасности по нормам АП 25 приложение F часть IV. По реологическим характеристикам материал сопоставим со стандартными материалами для FDM аддитивной технологии типа ABS и Nylon 618, по прочностным характеристикам новый материал превосходит конструкционный материал Nylon 618 (США) для FDM технологии (табл. 4) на 11,0%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-29-10186.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г». *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники. *Вестн. Рос. акад. наук*. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение. В кн.: Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2-14.
4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. *Сб. науч.-информац. материалов*. М.: ВИАМ. 2015. 720 с.
5. Авиационные правила. Часть 25. Самолёты транспортной категории. Редакция 4 с поправками 1 – 7 / Межгосуд. авиац. комитет. ОАО «Авиаиздат». 2013. 278 с.
6. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Бейдер Э.Я. Влияние модифицирующих добавок на пожаробезопасные свойства и технологичность поликарбоната. *Труды ВИАМ*. 2013. № 6. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.06.2016).

REFERENCES

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE "VIAM" SSC RF in realization of Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for period up to 2030 year. *Aviatsionnye materialy iologii*. 2015. N 1 (34). P. 3-33 (in Russian). DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aeronautics. *Vestnik Ros. Akademii Nauk*. 2012. V. 82. N 6. P. 520-530 (in Russian).
3. Kablov E.N. Aerospace material science. In book: All materials. Encyclopedic Handbook. 2008. N 3. P. 2-14 (in Russian).
4. Kablov E.N. Tendencies and landmarks of innovative development of Russia. Coll. of Sci.-Inf. Proceedings. M.: VIAM. 2015. 720 p. (in Russian).
5. Aviation regularities. Part 25. Transport airplanes. Reduction 4 with corrections 1-7. Interstate aviation committee. OAO Aviaizdat. 2013. 278 p. (in Russian).
6. Petrova G.N., Rumyantseva T.V., Beyder E.Ya. Influence of modifying additions on fire safety properties and technology of polycarbonate. *Trudy VIAM*. 2013. N 6. URL: <http://www.viam-works.ru> (in Russian).

7. **Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н., Румянцев Т.В.** Пожаробезопасные литые термопласты и термоэластопласты. *Труды ВИАМ*. 2013. № 11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.06.2016).
8. **Грязнов В.И., Петрова Г.Н., Юрков Г.Ю., Бузник В.М.** Смесеые термоэластопласты со специальными свойствами. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 1. С. 25-29. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-25-29.
9. **Барботко С.Л.** Пожаробезопасность авиационных материалов. *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 431-439.
10. **Барботко 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.
11. **Барботко 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.
12. **Барботко 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.
13. **Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L.** Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013. V. 67. P. 1191-1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.
14. **Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G.** Additive manufacturing methods and modeling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. V. 83. P. 389-405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
15. **Novakova-Marcincinova L., Kuric I.** Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology. *Manuf. and Ind. Eng.* 2012. V. 11. N 1. P. 24-27.
16. **Hill N., Haghi M.** Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping J.* 2014. V. 20. N 3. P. 221-227. DOI: 10.1108/RPJ-04-2013-0039.
17. **Masood S.H., Song W.Q.** Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modeling. *Materials and Design.* 2004. V. 25. P. 587-594. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.02.009.
18. **Croccolo 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. V. 79. P. 506-518. DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.06.041.
19. **Turner B., Strong R., Gold S.** A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping J.* 2014. V. 20. N 3. P. 192-204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012.
7. **Petrova G.N., Beiyder E.Ya., Perfilova D.N., Rumyantseva T.V.** Fire safety cast thermo polymers and thermo elastic polymers. *Trudy VIAM*. 2013. N 11. <http://www.viam-works.ru> (in Russian).
8. **Gryaznov V.I., Petrova G.N., Yurkov G.Yu., Buznik V.M.** Mixed thermo elastic polymers with special properties. *Aviatsionnye materualy i tekhnologii*. 2014. N 1. P. 25-29 (in Russian). DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-25-29.
9. **Barbotko S.L.** Fire safety of aviation materials. *Aviatsionnye materualy i tekhnologii*. 2012. N 5. P. 431-439 (in Russian).
10. **Barbotko S.L., Vol'nyiy O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N.** Features of tests of aviation materials on fire safety. Part 1. Combustibility tests. The influence of sample thickness on registered parameters. *Pozharovzryvobezopastnost*. 2015. N 1. P. 40-49 (in Russian).
11. **Barbotko S.L., Vol'nyiy O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N.** Features of tests of aviation materials on fire safety. Part 2. Combustibility tests. The influence of exposition with burner flame. *Pozharovzryvobezopastnost*. 2015. N 3. P. 13-24 (in Russian).
12. **Barbotko S.L., Vol'nyiy O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N.** Features of tests of aviation materials on fire safety. Part 3. Smoke formation tests. The influence of thickness of solid sample of polymer composite material. *Pozharovzryvobezopastnost*. 2015. N 4. P. 7-23 (in Russian).
13. **Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L.** Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013. V. 67. P. 1191-1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.
14. **Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G.** Additive manufacturing methods and modeling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. V. 83. P. 389-405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
15. **Novakova-Marcincinova L., Kuric I.** Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology. *Manuf. and Ind. Eng.* 2012. V. 11. N 1. P. 24-27.
16. **Hill N., Haghi M.** Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping J.* 2014. V. 20. N 3. P. 221-227. DOI: 10.1108/RPJ-04-2013-0039.
17. **Masood S.H., Song W.Q.** Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modeling. *Materials and Design.* 2004. V. 25. P. 587-594. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.02.009.
18. **Croccolo 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. V. 79. P. 506-518. DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.06.041.
19. **Turner B., Strong R., Gold S.** A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping J.* 2014. V. 20. N 3. P. 192-204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012.

20. **Durgun I., Ertan R.** Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping J.* 2014. V. 20. N 3. P. 228–235. DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.
21. **Riddick J.C., Haile M.A., Wahlde R.V., Cole D.P., Bamiduro O., Johnson T.E.** Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling. *Additive Manufacturing.* 2016. V. 11. P. 49–59. DOI: 10.1016/j.addma.2016.03.007.
22. **Dul S., Fambri L., Pegoretti A.** Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites. *Composites: Part A.* 2016. V. 85. P. 181–191. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.03.013.
23. **Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J. M., Garcia-Granada A.-A., Llumà J., Borros S., Reyes G.** Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design.* 2015. V. 83. P. 670–677. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.
20. **Durgun I., Ertan R.** Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping J.* 2014. V. 20. N 3. P. 228–235. DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.
21. **Riddick J.C., Haile M.A., Wahlde R.V., Cole D.P., Bamiduro O., Johnson T.E.** Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling. *Additive Manufacturing.* 2016. V. 11. P. 49–59. DOI: 10.1016/j.addma.2016.03.007.
22. **Dul S., Fambri L., Pegoretti A.** Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites. *Composites: Part A.* 2016. V. 85. P. 181–191. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.03.013.
23. **Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J. M., Garcia-Granada A.-A., Llumà J., Borros S., Reyes G.** Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design.* 2015. V. 83. P. 670–677. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.

*Поступила в редакцию 23.09.2016
Принята к опубликованию 20.12.2016*

*Received 23.09.2016
Accepted 20.12.2016*