

УДК 005.6 : 678.073

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2025 Д.В. Антипов, Р.С. Загидуллин, В.А. Матвеев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 22.01.2024

В работе проведен анализ и разработана классификация полимерных и композиционных материалов для изготовления деталей и узлов изделий авиакосмической техники в условиях аддитивного производства на основе критерия функционального назначения и структуры материала. Представлено функциональное назначение филаментов из разработанной классификации в авиакосмической отрасли. Приведены примеры деталей и узлов изделий авиакосмической техники, изготовленных методом 3D-печати по технологии FDM (Fused Deposition Modeling, моделирование методом послойного наплавления). Исходя из условий эксплуатации изделий авиакосмической техники сформирована номенклатура показателей качества материала для 3D-печати по технологии FDM.

Ключевые слова: качество, филамент, полимерный материал, композиционный материал, авиакосмическая техника, классификация, показатель качества, FDM-технология.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-12-23

EDN: SICOXR

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря достижениям в области разработки и производства полимерных и композиционных материалов существенно ускорился процесс внедрения 3D-печати технологии FDM (Fused Deposition Modeling, моделирование методом послойного наплавления) в производство деталей и узлов изделий авиакосмической техники [1-7].

3D-печать по технологии FDM заключается в построении физического объекта по электронной геометрической модели путем экструзии материала. Экструзия материала (material extrusion) – это процесс аддитивного производства, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер [8].

Материал, используемый для 3D-печати по технологии FDM, называют филаментом. Согласно ГОСТ Р 57558-2020 филамент – это нить калиброванного диаметра, получаемая непрерывным экструдированием полимерного материала и композиций на ее основе, обычно наматываемая на катушку» [9].

Филамент производят непрерывным экструдированием полимерного материала диаметрами 1,75, 2,85 и 3,00 мм по технологической документации, утвержденной в установленном порядке. Намотку филаментов при этом производят на катушки.

Филамент изготавливают из:

1) основных (базовых) полимерных материалов: полиамид (PA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтилентерефталат-гликоль (PETG), поликарбонат (PC), полипропилен (PP), ударопрочный полистирол (HIPS), полиэфирэфиркетон (PEEK), полисульфон (PSU), полиэфиримид (PEI) и другие;

2) композиционных материалов, в качестве матрицы которых выступают базовые полимерные материалы: стеклонаполненные композиции (PA12 + 12 % стекловолокна (GF12)), углеродонаполненные композиции (ABS + 15% углеволокна (CF15)), металлонаполненные композиции (Ultrafuse 316L – 80% конструкционная криогенная сталь 316L аустенитного класса + 20% полимер) и другие.

Сокращения (аббревиатуры) для указания материалов филаментов устанавливают в соответствии с ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) [10].

Антипов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: antipov.dv@ssau.ru

Загидуллин Радмир Салимьянович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru

Матвеев Виталий Александрович, аспирант кафедры организации и управления перевозками на транспорте. E-mail: Matveyev@inbox.ru

Транспортировку и хранение филаментов производят в вакуумированных пакетах из полимерной пленки с силикагелем внутри, а пакеты помещают в картонную коробку.

В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент филаментов для 3D-печати по технологии FDM, отличающиеся по химическому составу и структуре, физическим, механическим и технологическим свойствам, цвету и фактуре.

Для обеспечения оптимального уровня качества деталей и узлов изделий авиакосмической техники из полимерных и композиционных материалов, изготавливаемых методом 3D-печати по технологии FDM, необходимо прежде всего определить классификацию материалов по функциональному критерию и структуре материала. Кроме того, отсутствует номенклатура показателей качества материалов для 3D-печати по технологии FDM, которую необходимо разработать исходя из условий эксплуатации изделий авиакосмической техники.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка классификации полимерных и композиционных материалов для изготовления деталей и узлов изделий авиакосмической техники методом 3D-печати по технологии FDM на основе функционального критерия и структуры материала с последующим формированием номенклатуры показателей качества материала исходя из условий эксплуатации изделий.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Выбор полимерных и композиционных материалов для 3D-печати деталей и узлов изделий авиакосмической техники по технологии FDM производят исходя из заданных эксплуатационных условий изделий: воздействия электронного и протонного излучений космического пространства на космические аппараты (КА); вибрационные и ударно-импульсные воздействия, линейные ускорения и акустическое давление на ракеты-носители (РН); воздействие переменных температур, давления и плотности воздуха, воздействие обледенения, вибрационные, ударные и электромагнитные воздействия на самолеты и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и т.д. и с учетом экономической целесообразности.

На основе критерия функционального назначения и структуры материала разработана классификация полимерных и композиционных материалов для изготовления деталей и узлов изделий авиакосмической техники методом 3D-печати по технологии FDM на основе критерия функционального назначения и структуры материала (рис. 1).

Полимерные и композиционные материалы согласно разработанной классификации подразделены на 5 групп на основе критерия функционального назначения:

- 1) вспомогательные;
- 2) декоративные;
- 3) инженерные;
- 4) специальные;
- 5) функциональные.

Далее группы в зависимости от структуры материала подразделены на подгруппы. Каждой подгруппе в классификации приведены примеры (в том числе названия) полимерных и композиционных материалов (филаментов) для 3D-печати по технологии FDM. Названия приведены для филаментов, производители которых не раскрывают точный состав и пропорции материалов, но, как правило, указывают геометрические, физические, технологические и эксплуатационные свойства.

Под структурой материала в настоящей работе понимается однородная и композиционная структуры. Однородную структуру имеют филаменты для поддержки (PVA), чистящие (eClean), гибкие (TPE D70, BFlex, Easy Flex), базовые (стандартные) (PA6, PA12, ABS, PP, PS) и тугоплавкие базовые (PEEK, PEI) полимерные материалы.

Остальные подгруппы филаментов имеют композиционную структуру: металлонаполненные (BFBronze, Ultrafuse 316L), древесно-полимерные (eSun Wood, Woodfill), керамо-полимерные (Ceramo, ABS Керамика), люминесцентные (PETG Lumi), угленаполненные (PA6+CF30, ABS+CF15), стеклонаполненные (PA12+GF12, PETG+GF12), теплопроводящие (PA66 TC black 3989V), электропроводящие (Conductive graphene filament), радиационноустойчивые (ABS+TiO₂, PEEK+W) и другие.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения (аббревиатуры) для наполнителей композиционных материалов: TiO₂ – оксид четырехвалентного титана, RG – искусственный аналог реголита, W – вольфрам, B₄C – карбид бора (бинарное соединение бора с углеродом), Fe₃O₄ – оксид железа черный, CNT – углеродная нанотрубка. Сокращения (аббревиатуры) для указания материалов филаментов, как было указано выше, устанавливают в соответствии с ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) [10].

В таблице 1 представлено функциональное назначение каждой группы и подгруппы филаментов из разработанной классификации в авиакосмической отрасли.

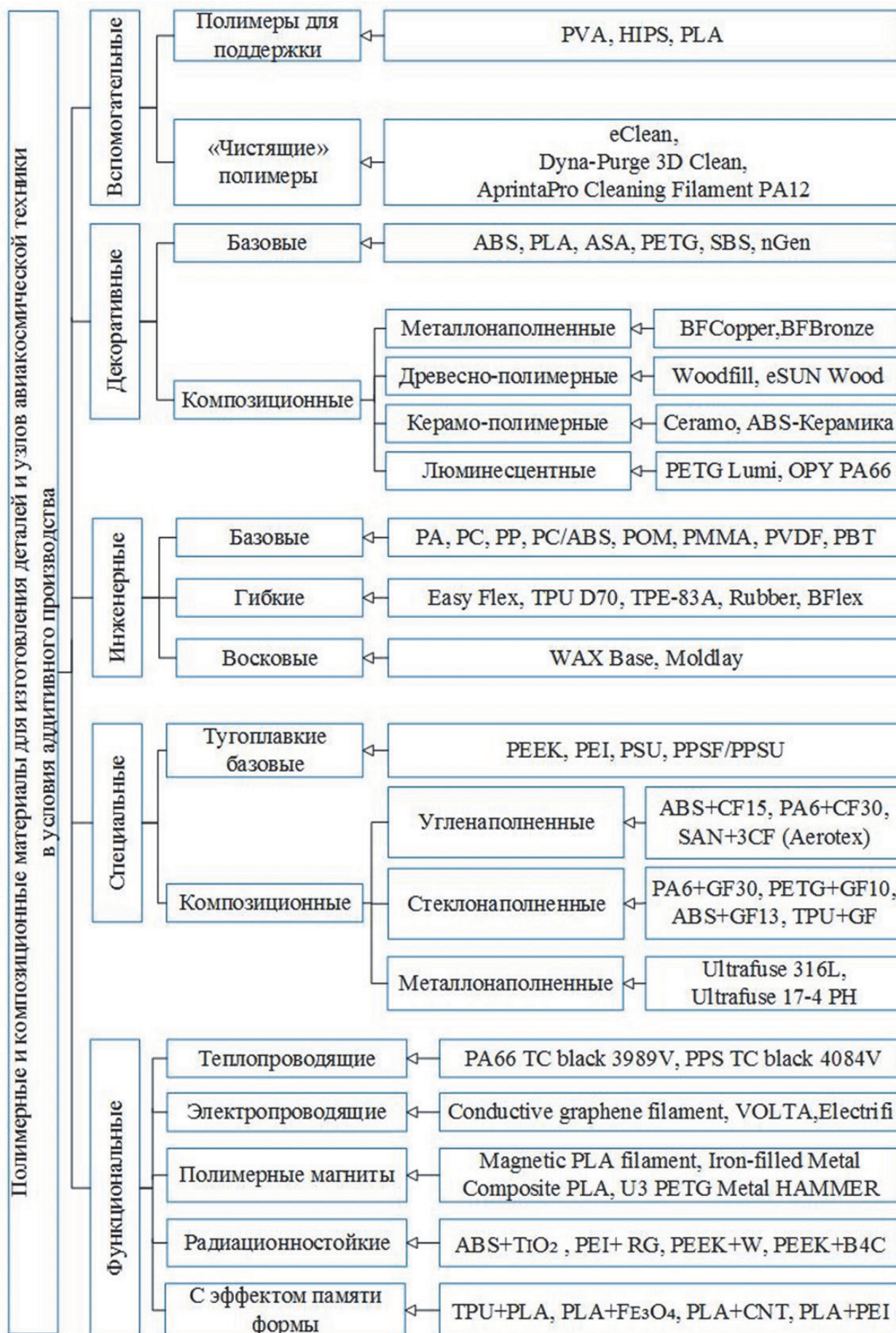


Рис. 1. Классификация полимерных и композиционных материалов для изготовления авиакосмической техники в условиях аддитивного производства

Для интерьера самолета Airbus A320 методом FDM 3D-печати из декоративных филаментов изготавливают распорные панели (рисунок 2) [11].

Для изготовления гибких соединительных балок трансформирующего крыла БПЛА сотрудники Калифорнийского государственного университета, США, использовали метод FDM 3D-печати из инженерного филамента Nylon Alloy 910 (рисунок 3) [6].

Таблица 1. Функциональное назначение филаментов в авиационно-космической отрасли

Группа филаментов	Подгруппа филаментов	Функциональное назначение
Вспомогательные	Полимеры для поддержки	Растворяемая поддержка
	Чистящие	Чистка сопла экструдера
Декоративные	Базовые	Элементы внутреннего интерьера самолетов, декоративные детали и узлы БПЛА, выставочные макеты и макеты для отработки сборочных процессов изделий авиакосмической техники
	Композиционные	
Инженерные	Базовые	Корпусные элементы, крылья и винты БПЛА, кронштейны полезной нагрузки БПЛА, элементы внутреннего интерьера самолетов, технологическое оснащение для сборки узлов и агрегатов РН, КА, БПЛА и самолетов, соединительные узлы датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) РН, КА и БПЛА, корпусные элементы бортовой радиоэлектронной аппаратуры БПЛА и самолётов, транспортные принадлежности РН, КА, заглушки сопел мембранного типа
	Гибкие	Прокладки, проставки, демпферы, уплотнители, амортизатора, кожухи для защиты электронных компонентов и чувствительной механики от ударного воздействия
	Восковые	Отливки и модели деталей и узлов изделий авиакосмической техники
Специальные	Тугоплавкие базовые	Корпусные элементы БПЛА, воздухопроводы и системы кондиционирования РН и самолетов, опоры антенных решеток КА, лопатки вентиляторов, соединительные узлы ДПА РН, КА и БПЛА, патрубки авиадвигателей, корпусные элементы бортовой радиоэлектронной аппаратуры БПЛА и самолётов, транспортные принадлежности РН, КА
	Композиционные	
Функциональные	Теплопроводящие	Соединительные узлы ДПА РН, КА и БПЛА, корпусные элементы бортовой радиоэлектронной аппаратуры РН, КА и БПЛА

Таблица 1. Функциональное назначение филаментов в авиационно-космической отрасли (окончание)

	Электропроводящие	Элементы радиоэлектронной аппаратуры и электронной компонентной базы изделий авиакосмической техники
	Полимерные магниты	Бесконтактные датчики, электроизмерительные приборы, элементы акустических систем, магнитные фильтры
	Радиационно-стойкие	Корпусные элементы приборов КА, космических и автоматических межпланетных станций
	С эффектом памяти формы	Интеллектуальные приводы, раздвигаемые конструкции космической техники



Рис. 2. Распорная панель Airbus A320

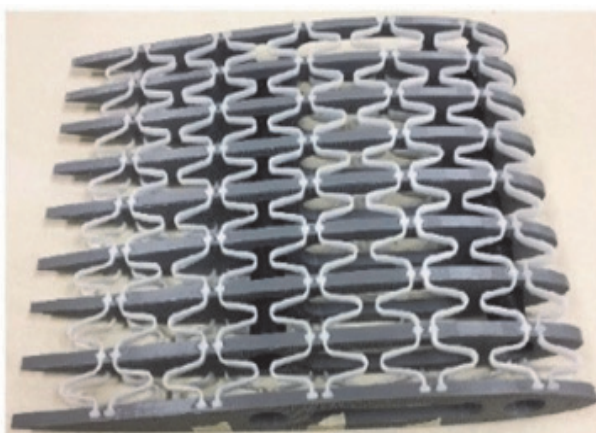


Рис. 3. Трансформирующее крыло БПЛА

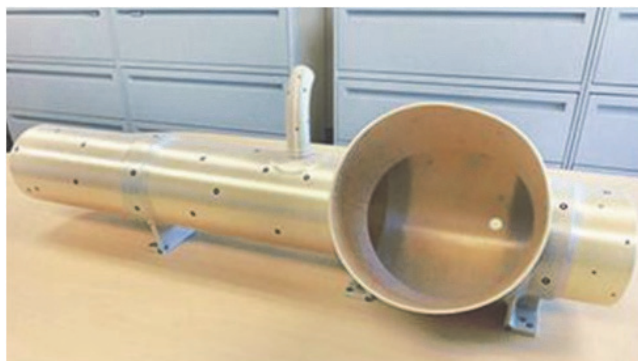


Рис. 4. Воздуховод системы кондиционирования конструкции PH Atlas V

На рис. 3 представлен воздуховод системы кондиционирования конструкции PH Atlas V производства компании United Launch Alliance (США), изготовленный методом FDM 3D-печати из специального тугоплавкого филамента ULTEM 9085 с условиями эксплуатации от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+107\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4) [2].

Методом FDM 3D-печати изготовлены для космического аппарата FORMOSAT-7 (США) для метеорологических систем наблюдения 30 опор антенных решеток из специального тугоплавкого филамента ULTEM 9085 (рис. 5) [2].

В работе [12] спроектирована и изготовлена методом FDM 3D-печати печатная плата с использованием функционального токопроводящего филамента Electrifi (рис. 6).

Авторами работы [13] изготовлен методом FDM 3D-печати актуатор из полимерного материала с эффектом памяти формы (рис. 7).

Наиболее близкий аналог разработанной классификации представлен в работе [13], где полимерные и композиционные материалы, применяемые для FDM 3D-печати, разделены на 4 группы по критерию функционального назначения: дизайнерские, вспомогательные, инженерные и спе-

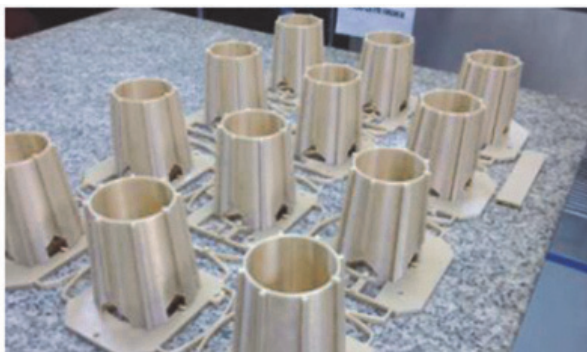


Рис. 5. Опоры антенных решеток КА FORMOSAT-7, изготовленные методом FDM 3D-печати

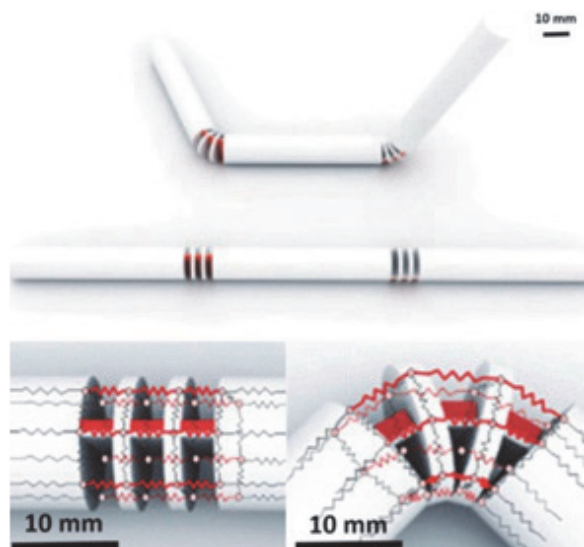
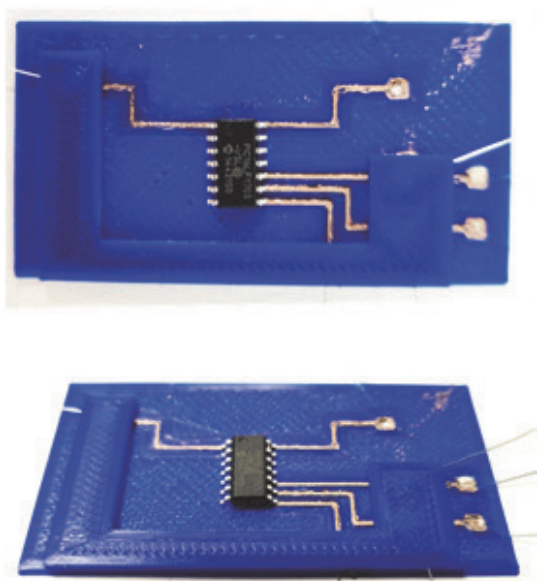


Рис. 6. Печатная плата, изготовленная методом FDM 3D-печати

Рис. 7. Актуатор, изготовленный методом FDM 3D-печати из полимерного материала с эффектом памяти формы

циальные филаменты. С привязкой к каждой группе в классификации [14] представлены примеры полимерных и композиционных материалов. В настоящей работе, как видно из рисунка 1, разработанная классификация подразделена на 5 групп с подгруппами на основе критерия функционального назначения и структуры материала с привязкой к изготовлению деталей и узлов изделий авиакосмической техники (таблица 1).

В работах [15-20] представлены перечни полимерных и композиционных материалов для FDM 3D-печати без применения матричной схемы и привязки по критерию функционального назначения в авиационно-космической отрасли.

В работе [21] представлен перечень и описание полимерных и композиционных материалов с физико-механическими свойствами, но, как и в работах [13-19], без применения матричной схемы и привязки по критерию функционального назначения.

2. НОМЕНКЛАТУРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM

Качество материала – это совокупность его свойств: химических, физических, механических, технологических и т.д., удовлетворяющих определенные требования в соответствии с его назначением.

Показатель качества материала – количественная характеристика свойств материала, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным этапам его жизненного цикла.

Свойство продукции – это объективная особенность продукции, которая может проявляться при ее создании, эксплуатации или потреблении [22], т.е. рассматриваемая применительно к определенным этапам жизненного цикла продукции [23].

Совокупность свойств филамента составляют главным образом химические, физические, механические, технологические, эксплуатационные, экологические и эстетические свойства.

На основе перечисленных свойств и критерия функционального назначения разработана номенклатура показателей качества материала для 3D-печати по технологии FDM деталей и узлов изделий авиакосмической техники (табл. 2).

Таблица 2. Номенклатура показателей качества материала для 3D-печати по технологии FDM изделий авиакосмической техники

Характеризуемое свойство	Показатель качества	Единица измерения
1 Технический уровень		
1.1 Показатели назначения		
Химическое свойство	Химический состав	%
	Однородность структуры	%
	Стойкость к УФ-излучению	%
	Кислотостойкость	%
	Щелочестойкость	%
Физическое свойство	Плотность	г/см ³
	Гигроскопичность	%
	Морозостойкость	°С, циклы
	Воздухостойкость	%
	Температура плавления	°С
	Температура стеклования	°С
	Теплопроводность	Вт/(м·К)
	Магнитная индукция	Тесла
	Коэффициент линейного теплового расширения	К ⁻¹
Механическое свойство	Прочность при растяжении вдоль слоев	МПа
	Прочность при растяжении поперек слоев	МПа
	Прочность на изгиб	МПа
	Прочность на сжатие	МПа
	Твёрдость по Шору	Числовое значение
	Ударная вязкость по Шарпи	кДж/м ²
	Прочность при срезе	МПа
	Предел ползучести	МПа
Электрическое свойство	Удельное объемное электрическое сопротивление	Ом·м
	Электрическая прочность	кВ/мм

Допускается сокращение или использование других показателей качества филаментов из предложенной номенклатуры исходя из условий эксплуатации деталей и узлов изделий авиакосмической техники, получаемых методом 3D-печати по технологии FDM, по согласованию с потребителем (заказчиком).

Таблица 2. Номенклатура показателей качества материала для 3D-печати по технологии FDM изделий авиакосмической техники (продолжение)

	Диэлектрическая проницаемость на постоянном токе	Числовое значение
Эксплуатационное свойство	Потеря массы при вакуумно-тепловом воздействии	%
	Содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии	%
	Теплостойкость	%
	Когезия	МПа
	Адгезия	МПа
	Кислородный индекс (горючесть пластмасс)	% O ₂
	Температура эксплуатации	°С
	Радиационный индекс (радиационная стойкость)	Числовое значение
1.2 Показатели надежности		
Эксплуатационное свойство	Предел выносливости	МПа
	Показатель истирания	мм ³ /м
	Предел длительной прочности	МПа
	Наличие трещин, изломов, пор	–
	Гарантийный срок хранения	мес
1.3 Показатели конструктивности		
Геометрическое свойство	Вариабельность диаметра прутка филамента	мм
	Длина	мм
	Масса	кг
1.4 Показатели технологичности		
Технологическое свойство	Усадка	%
	Показатель текучести расплава	г/10 мин
	Коэффициент обрабатываемости резанием	Числовое значение
	Смачиваемость	%
	Гвоздимость	МПа

Таблица 2. Номенклатура показателей качества материала для 3D-печати по технологии FDM изделий авиакосмической техники (окончание)

	Энергоемкость изготовления	кВт·ч/м ²
1.5 Показатели транспортабельности		
Эксплуатационное свойство	Трудоемкость контейнеризации и пакетирования	Чел.-ч.
	Габаритные размеры	мм
1.6 Показатели эстетические		
Эстетическое свойство	Цвет	Эталон
	Фактура	Балл
1.7 Показатели эргономические		
Экологическое свойство	Экологически чистый наполнитель	–
	Вторичное использование полимерного материала	Да/нет
	Предельно допустимые концентрации продуктов термоокислительной деструкции полимерного материала	мг/м ³
	Биоразлагаемость	Да/нет
2 Экономическая эффективность		
Экономическое свойство	Себестоимость	Руб/ед
	Оптовая цена	Руб/ед
3 Конкурентоспособность		
Конкурентоспособное свойство	Показатель патентной чистоты	–
	Показатель патентной защиты	–

Так, например, при разработке и изготовлении деталей и узлов интерьера самолетов такие показатели качества, как радиационный индекс, магнитная индукция, удельное объемное электрическое сопротивление, морозостойкость и т.п. не рассматривают. Однако, при разработке и изготовлении, например, соединительных узлов ДПА КА или корпусных элементов бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА, рассмотрение и контроль указанных показателей качества будут проводиться в первую очередь (в приоритетном порядке).

В работе [24] разработана система показателей качества процесса изготовления углерод-углеродных композиционных материалов в матричной форме. Автором работы [25] сформирована система показателей качества изготовления заклепок из композиционных материалов для изделий авиакосмической отрасли в табличной форме. В работе [26] в табличной форме представлены геометрические показатели качества (показатели конструктивности) поверхностей изделий ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов.

В настоящей работе сформирована в табличной форме номенклатура показателей качества материала для 3D-печати деталей и узлов изделий авиакосмической техники по технологии FDM на основе функционального критерия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана классификация полимерных и композиционных материалов для изготовления деталей и узлов изделий авиакосмической техники методом 3D-печати по техно-

логии FDM на основе функционального критерия и структуры материала. Представлено функциональное назначение филаментов из разработанной классификации в авиакосмической отрасли. Приведены примеры деталей и узлов изделий авиакосмической техники, изготовленных методом 3D-печати по технологии FDM. Сформирована в табличной форме номенклатура показателей качества материала для 3D-печати деталей и узлов изделий авиакосмической техники по технологии FDM на основе функционального критерия.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку функционально-структурной модели обеспечения качества системы проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации деталей и узлов изделий авиакосмической техники из полимерных и композиционных материалов в условиях аддитивного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулик, В.И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. Учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2018. – 160 с.
2. The University of Sheffield [Электронный ресурс]: FDM-printed fixed wing UAV. URL: <https://www.amrc.co.uk/case-studies/fdm-printed-fixed-wing-uav> (дата обращения 17.12.2024).
3. Malfitano B. Evaluation and Implementation of Additive Manufacturing Technologies for Structural Applications // Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference and 29th Symposium, June 5th-9th, 2017. PP. 1154-1155.
4. Евтодьева, М.Г. Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли / М.Г. Евтодьева // Вестник МГИМО-Университета. – 2020. – № 13(5). – С. 307-330.
5. Development of a New Span-Morphing Wing Core Design / P.L. Bishay, K.E.B. Sepulveda, A. Akinwunmi, R. Phan // Designs. 2019. Vol. 3(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/designs3010012>.
6. Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic / A.F. Salenko, I.I. Derevianko, A.A. Samusenko, K.V. Avramov, A.V. Lithot, V.V. Rogulin // Mech. Adv. Technol. 2021. Vol. 5. № 3. PP. 282–293.
7. Development of light weight multi-rotor UAV structures through synergistic application of design analysis and fused deposition modelling / B. Esakki, N.V.S.S. Sagar, C.Udayagiri, S. Sachin // International Journal of Materials and Product Technology. 2019. Vol. 59. № 3. PP. 229-238. DOI:10.1504/IJMPT.2019.10024474
8. ГОСТ Р 57557-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
9. ГОСТ Р 59100-2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.
10. ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные. – М.: Стандартинформ. – 2015. – 20 с.
11. Additive manufacturing of structural materials / L. Guo, Z. Xiaofeng, C. Xuliang, H. Yunhu, C. Lizi, H. Mengke, Y. Jianan, H. Fengqian, S. Chen, P. Wang, S. Yi, L. Wan, Z. Mao, Z. Chen, X. Wang, Z. Cao, J. Lu // Materials Science and Engineering: Reports. 2021. Vol. 145. 67 p. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.
12. H. Nassar, R. Dahiya Fused Deposition Modeling-Based 3D-Printed Electrical Interconnects and Circuits // Adv. Intell. Syst. Vol. 3. №12. DOI:10.1002/aisy.202100102
13. Active printed materials for complex self-evolving deformations / Raviv D., Zhao W., McKnelly C., Papadopoulou A., Kadambi A., Shi B., Hirsch S., Dikovskiy D., Zyacki M., Olguin C., Raskar R., Tibbits S. // Sci. Rep. Vol. 4 (2014). P. 7422.
14. Хейфец, М.Л. Классификация полимерных композиционных материалов, используемых в FDM-технологии / М.Л. Хейфец, Н.Л. Грецкий., Д.С. Ратуцкая, Ф.Л. Баранов, А.И. Гутковский // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сборник докладов международного научно-практического симпозиума, Минск, 30 сентября 2020 года. Национальная академия наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии. – Минск: Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука», 2020. – С. 141-149.
15. Михеенко, Д.Ю. Расходные материалы для 3D печати методом послойного наплавления (FDM/FFF) / Д.Ю. Михеенко, В.М. Михеенко // Знание. – 2016. – №11-1(40). – С. 37-43.
16. Михеенко, И.В. Композиционные материалы и термопласты, применяемые в аддитивных технологиях / И.В. Михеенко, А.А. Смелик, А.В. Фролов, С.А. Егоров // Технологии энергообеспечения. Аппараты и машины жизнеобеспечения: сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. – 2020. – С. 211-219.
17. Жуков, А.В. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) / А.В. Жуков, А.А. Никифиров, А.С. Яковичин // Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – 2021. – № 4(91). – С. 57-70.
18. Преображенская, Е.В. Анализ композиционных материалов для 3D-печати по технологии FDM / Е.В. Преображенская, А.Д. Кружков, М.С. Крештин // Оптические технологии, материалы и системы: сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА. Под редакцией А.С. Сигова. – М.: 2022. – С. 210-213.
19. Шумская, Е.Е. Угленасыщенные термопласты для 3D-печати / Е.Е. Шумская, Т.В. Жидко, Е.В. Шараев, А.В. Петкевич // Перспективы развития аддитивных технологий в республике Беларусь: доклады Международного научно-практического симпозиума. – Минск, 2022. – С. 162-170.
20. Якубова, Л.Ю. Полимеры и пластики, используемые в 3D-печати / Л.Ю. Якубова // Экономика и инновации: сборник статей участников межвузовской научно-практической конференции. В 3-х томах. – М.: 2024 – С. 145-149.

21. 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications / P. Soyeon, S. Wan, M. Liane, M. Wojciech, F. Kun // *Matter*. Vol. 5, Issue 1. PP. 43 - 76 DOI: 10.1016/j.matt.2021.10.018.
22. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 1979. – 22 с.
23. Гарельский, В.А. Формирование номенклатуры показателей качества продукции: методические указания / В.А. Гарельский, А.В. Куприянов. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 52 с.
24. Антипова, Т.Н. Система показателей качества углерод-углеродных композиционных материалов и технологии их изготовления / Т.Н. Антипова, Д.С. Широян // *Информационно-технологический вестник*. – 2018. – № 3 (17). – С. 127-132.
25. Кузьмин, Н.А. Формирование показателей качества заклепок из композиционных материалов / Н.А. Кузьмин // *Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы Всероссийской конференции с международным участием, 23–24 ноября 2017 года*. – С. 366-369.
26. Дударев, А.С. Геометрические характеристики качества поверхностей изделий из полимерных композиционных материалов / А.С. Дударев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2013. – № 1. – С. 178-182.

DEVELOPMENT CLASSIFICATION OF POLYMERIC AND COMPOSITION MATERIALS FOR PRODUCTION OF AEROSPACE EQUIPMENT IN THE CONDITIONS OF ADDITIVE PRODUCTION

© 2025 D.V. Antipov, R.S. Zagidullin, V.A. Matveev

Samara National Research University, Samara, Russia

The paper analyzes and develops a classification of polymer and composite materials for the manufacture of parts and units of aerospace products in additive manufacturing based on the criterion of functional purpose and structure of the material. The functional purpose of filaments from the developed classification in the aerospace industry is presented. Examples of parts and units of aerospace products manufactured by 3D printing using FDM (Fused Deposition Modeling) technology are given. Based on the operating conditions of aerospace products, a nomenclature of material quality indicators for 3D printing using FDM technology has been formed.

Keywords: quality, filament, polymer material, composite material, aerospace engineering, classification, quality indicator, FDM technology.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-12-23

EDN: SICOXR

REFERENCES

1. Kulik, V.I. Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdelij aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy tekhniki. Uchebnoe posobie / V.I. Kulik, A.S. Nilov. – SPb.: Balt. gos. tekhn. un-t, 2018. – 160 s.
2. The University of Sheffield [Elektronnyj resurs]: FDM-printed fixed wing UAV. URL: <https://www.amrc.co.uk/case-studies/fdm-printed-fixed-wing-uav> (data obrashcheniya 17.12.2024).
3. Malfitano B. Evaluation and Implementation of Additive Manufacturing Technologies for Structural Applications // *Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference and 29th Symposium, June 5th-9th, 2017*. PP. 1154-1155.
4. Evtod'eva, M.G. Additivnoe proizvodstvo i dopolnennaya real'nost' kak novye proizvodstvennye tekhnologii v aviacionnoj otrasli / M.G. Evtod'eva // *Vestnik MGIMO-Universiteta*. – 2020. – № 13(5). – С. 307-330.
5. Development of a New Span-Morphing Wing Core Design / P.L. Bishay, K.E.B. Sepulveda, A. Akinwunmi, R. Phan // *Designs*. 2019. Vol. 3(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/designs3010012>.
6. Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic / A.F. Salenko, I.I. Derevianko, A.A. Samusenko, K.V. Avramov, A.V. Lithot, V.V. Rogulin // *Mech. Adv. Technol.* 2021. Vol. 5. № 3. RR. 282–295.
7. Development of light weight multi-rotor UAV structures through synergistic application of design analysis and fused deposition modelling / B. Esakki, N.V.S.S. Sagar, C.Udayagiri, S. Sachin // *International Journal of Materials and Product Technology*. 2019. Vol. 59. № 3. PP. 229-238. DOI:10.1504/IJMPT.2019.10024474
8. GOST R 57557-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Additivnye tekhnologicheskie processy. Bazovye principy. – М.: Standartinform, 2018. – 16 s.
9. GOST R 59100-2020 Plastmassy. Filamenty dlya additivnyh tekhnologij. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. – М.: Standartinform, 2020. – 11 s.
10. GOST 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) Plastmassy. Uslovnye oboznacheniya i sokrashcheniya. Chast' 1. Osnovnye polimery i ih special'nye. – М.: Standartinform. – 2015. – 20 s.
11. Additive manufacturing of structural materials / L. Guo, Z. Xiaofeng, C. Xuliang, H. Yunhu, C. Lizi, H. Mengke, Y. Jianan, H. Fengqian, S. Chen, P. Wang, S. Yi, L. Wan, Z. Mao, Z. Chen, X. Wang, Z. Cao, J. Lu // *Materials Science and*

- Engineering: Reports. 2021. Vol. 145. 67 p. DOI:https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596.
12. H. Nassar, R. Dahiya Fused Deposition Modeling-Based 3D-Printed Electrical Interconnects and Circuits // Adv. Intell. Syst. Vol. 3. №12. DOI:10.1002/aisy.202100102
 13. Active printed materials for complex self-evolving deformations / Raviv D., Zhao W., McNelly C., Papadopoulou A., Kadambi A., Shi B., Hirsch S., Dikovskiy D., Zyracki M., Olguin C., Raskar R., Tibbits S. // Sci. Rep. Vol. 4 (2014). P. 7422.
 14. Hejfec, M.L. Klassifikaciya polimernyh kompozicionnyh materialov, ispol'zuemyh v FDM-tehnologii / M.L. Hejfec, N.L. Greckij., D.S. Ratuckaya, F.L. Baranov, A.I. Gutkovskij // Perspektivy razvitiya additivnyh tekhnologij v Respublike Belarus': sbornik dokladov mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma, Minsk, 30 sentyabrya 2020 goda. Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, GNPO poroshkovej metallurgii. – Minsk: Respublikanskoe unitarnoe predpriyatie «Izdatel'skij dom «Belorusskaya nauka», 2020. – S. 141-149.
 15. Miheenko, D.Yu. Raskhodnye materialy dlya 3D pechati metodom poslojnego naplavljeniya (FDM/FFF) / D.Yu. Miheenko, V.M. Miheenko // Znanie. – 2016. – №11-1(40). – С. 37-43.
 16. Miheenko, I.V. Kompozicionnye materialy i termoplasty, primenyaemye v additivnyh tekhnologiyah / I.V. Miheenko, A.A. Smelik, A.V. Frolov, S.A. Egorov // Tekhnologii energoobespecheniya. Apparaty i mashiny zhizneobespecheniya: sbornik statej II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – 2020. – S. 211-219.
 17. Zhukov, A.V. Plastmassy dlya additivnyh tekhnologij (obzor) / A.V. Zhukov, A.A. Nikifirov, A.S. Yakovishin // Saratovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni Gagarina Yu.A. – 2021. – № 4(91). – S. 57-70.
 18. Preobrazhenskaya, E.V. Analiz kompozicionnyh materialov dlya 3D-pechati po tekhnologii FDM/E.V. Preobrazhenskaya, A.D. Kruzhkov, M.S. Kreshtin // Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii IPTIP RTU MIREA. Pod redakciej A.S. Sigova. – M.: 2022. – S. 210-213.
 19. Shumskaya, E.E. Uglenapolnennye termoplasty dlya 3D-pechati / E.E. Shumskaya, T.V. Zhidko, E.V. Sharaev, A.V. Petkevich // Perspektivy razvitiya additivnyh tekhnologij v respublike Belarus': doklady Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma. – Minsk, 2022. – S. 162-170.
 20. Yakubova, L.Yu. Polimery i plastiki, ispol'zuemye v 3D-pechati / L.Yu. Yakubova // Ekonomika i innovacii: sbornik statej uchastnikov mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 3-h tomah. – M.: 2024 – S. 145-149.
 21. 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications / P. Soyeon, S. Wan, M. Liane, M. Wojciech, F. Kun // Matter. Vol. 5, Issue 1. PP. 43 - 76 DOI: 10.1016/j.matt.2021.10.018.
 22. GOST 15467-79 Upravlenie kachestvom produkcii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. – M.: IPK «Izdatel'stvo standartov», 1979. – 22 s.
 23. Garel'skij, V.A. Formirovanie nomenklatury pokazatelej kachestva produkcii: metodicheskie ukazaniya / V.A. Garel'skij, A.V. Kupriyanov. – Orenburg: OGU, 2020. – 52 s.
 24. Antipova, T.N. Sistema pokazatelej kachestva uglepod-uglerodnyh kompozicionnyh materialov i tekhnologii ih izgotovleniya / T.N. Antipova, D.S. Shiroyan // Informacionno-tekhnologicheskij vestnik. – 2018. – № 3 (17). – S. 127-132.
 25. Kuz'min, N.A. Formirovanie pokazatelej kachestva zaklepkov iz kompozicionnyh materialov / N.A. Kuz'min // Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoj nauki: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, 23–24 noyabrya 2017 goda. – S. 366-369.
 26. Dudarev, A.S. Geometricheskie harakteristiki kachestva poverhnostej izdelij iz polimernyh kompozicionnyh materialov / A.S. Dudarev // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2013. – № 1. – S. 178-182.

Dmitry Antipov, Doctor of Technics, Professor, Head of the Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering.

E-mail: antipov.dv@ssau.ru

Admir Zagidullin, Candidate of Technics, Senior Lecturer of Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering.

E-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru

Vitaly Matveev, Postgraduate Student of the Department of Organization and Management of Transportation in Transport.

E-mail: Matveyev@inbox.ru