

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИКОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

В. С. Иванов, А. А. Васильев, В. В. Шеденко,
Д. И. Фимин, М. С. Христюк

Рассматриваются характеристики поведения при термических испытаниях изделий (корпусов приборов) и готовых приборов, изготовленных из пластиков методом 3D-печати. В работе представлен сравнительный анализ десяти наиболее актуальных пластиков: акрилонитрилбутадиенстирола, полилактида, полиэтилентерефталатгликоля, термопластичного полиуретана, нейлона, акрилонитрилстиролакрилата, поликарбоната, ударопрочного полистирена, поливинилового спирта, полиэфирэфиркетона. Показаны их плюсы и минусы. Для термических испытаний были выбраны корпуса приборов разработанной в студенческом конструкторском бюро «Спутник» Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА системы, предназначенной для выявления деформаций в протяженных объектах, изготовленные методом 3D-печати из пластиков: акрилонитрилбутадиенстирола, полилактида и поликарбоната. Проведенные термические испытания при температурах от -60 до 40°C показали отсутствие образования дефектов изделий, изготовленных из всех испытываемых типов пластиков. Приборы с элементами, выполненными из тестируемых пластиков, после термических испытаний не выявили нарушений функций.

Ключевые слова: пластики, 3D-печать, термические испытания.

Введение

3D-печать – это одна из самых инновационных технологий современности, трансформирующая подход к созданию прототипов и изделий. Она охватывает широкий спектр направлений науки и техники – от медицины и архитектуры до автомобилестроения и искусства. Уникальная особенность 3D-печати заключается в возможности создавать сложные формы с высокой точностью и минимальными отходами. Кроме того, использование этой технологии открывает новые горизонты для производства, значительно ускоряя разработку и снижая затраты. Пластики (полимеры) – широко используемые материалы, применяемые при изготовлении изделий методами 3D-печати. Среди множества номенклатур пластиков в работе представлен сравнительный анализ десяти наиболее актуальных: акрилонитрилбутадиенстирола (ABS), полилактида (PLA), полиэтилентерефталатгликоля (PETG), термопластичного полиуретана (TPU) нейлона (Nylon), акрилонитрилстиролакрилата (ASA), поликарбоната (Polycarbonate – PC), ударопрочного полистирена (High Impact Polystyrene – HIPS), поливинилового спирта (PVA), полиэфирэфиркетона (PEEK).

Актуальность исследования обусловлена быстрорастущим развитием аддитивных технологий 3D-печати и результатами исследования термической стабильности изделий из пластика, полученных методом 3D-печати в широком диапазоне температур. Анализируется поведение изделий, изготовленных из пластиков, и готовых приборов, использующих компоненты, изготовленные методом 3D-печати, при температурах от -60 до $+40^{\circ}\text{C}$. Объекты исследования – корпуса приборов, изготов-

ленные методом 3D-печати, из пластиков ABS, PLA и PC, и система, разработанная в студенческом конструкторском бюро (СКБ) «Спутник» Института радиоэлектроники и информатики (ИРИ) РТУ МИРЭА, предназначенная для выявления деформаций в протяженных объектах. Система включает в себя передатчик, излучающий лазерный луч, и приёмный модуль, состоящий из фоточувствительной матрицы, LCD-дисплея и модуля ESP32. Для испытаний на термостабильность изделий из пластиков была выбрана компактная камера сверхнизкой температуры модели MC-812R (*MC-812R Compact Ultra Low Temperature Chamber*). Термические испытания проводились при температурах -30°C – 2 часа; -60°C – 2 часа; 30°C – 2 часа; 40°C – 2 часа.

Технология 3D-печати с использованием пластиков (полимеров)

3D-печать или аддитивный технологический процесс – революционная технология, позволяющая создавать трехмерные объекты последовательным наложением слоев материала. Изначально, из-за дороговизны оборудования, 3D-печать была ограничена изготовлением прототипов и аэрокосмической промышленностью. Увеличение номенклатуры специализированных полимеров (пластиков) для 3D-печати и улучшение их свойств позволило распространить аддитивные технологии на множество других отраслей производства и направлений науки и техники [1 – 4]. Специализированные методы и инфраструктура, используемая в 3D-печати, стремительно развиваются в автомобильной, аэрокосмической, электронной промышленности, информационных технологиях, биомедицинской инженерии. 3D-печать привлекает

производителей и исследователей не только экономией материалов и затрат, но и рядом преимуществ, в частности, точностью изготовления деталей, причем сложной геометрии, имеющих внутренние полости, а также использованием нескольких материалов в одном изделии. Проектирование объекта может осуществляться в программном обеспечении CAD, для этого необходима и достаточно подготовка файла STL с определенными размерами изделия.

Одно из основных направлений развития технологий 3D-печати – оптимизация свойств полимеров (пластиков). Свойства полимеров достаточно легко изменить с помощью добавок (наполнителей) [2].

Возможность выбора и настройки пластика под определенные задачи приводит не только к все более широкому использованию 3D в традиционных направлениях, но и находит новые ниши использования, заменяя керамические материалы, металлы и сплавы. В настоящее время при производстве, использующем пластики в аддитивных технологиях, используется около 100 номенклатур полимеров [5]. В рамках представленной работы мы ограничимся рассмотрением и сравнением свойств нескольких наиболее широко распространенных материалов. Характеристики пластиков, а также их положительные и отрицательные свойства представлены в табл. 1 и 2, соответственно.

Таблица 1

Характеристики пластиков

Материал	Температура сопла, °C	Температура стола, °C	Температура термомодеформации, °C	Предел прочности на разрыв, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Относительное удлинение, %	Плотность, г/см ³
ABS	230 – 260	90 – 100	75 – 80	40 – 45	60 – 70	10 – 20	1,02 – 1,06
PLA	190 – 230	40 – 60	50 – 60	55 – 60	80 – 83	4 – 6	1,22 – 1,25
PETG	220 – 270	60 – 80	75 – 80	50 – 55	75 – 78	2 – 3	1,27 – 1,3
TPU	220 – 250	30 – 60	80 – 100	25 – 50	30 – 50	300 – 700	1,1 – 1,3
Nylon	220 – 260	100 – 120	110 – 130	30 – 50	40 – 70	5 – 20	1,1 – 1,3
ASA	240 – 260	90 – 110	90 – 100	30 – 50	40 – 70	5 – 15	1,06 – 1,08
PC	270 – 310	90 – 110	100 – 115	60 – 70	70 – 100	5 – 15	1,15 – 1,2
HIPS	265 – 280	100 – 105	65 – 75	30 – 50	40 – 60	10 – 12	1,35 – 1,45
PVA	190 – 220	50 – 70	55 – 70	40 – 50	25 – 30	290 – 310	1,19 – 1,2
PEEK	340 – 360	110 – 120	140 – 145	90 – 100	100 – 120	20 – 25	1,25 – 1,3

Таблица 2

Преимущества и недостатки пластиков

Материал	Преимущества	Недостатки
ABS	Высокая ударпрочность, термостабильность	Токсичность
PLA	Экологичность, легкость	Низкая термостойкость, хрупкость
PETG	Химическая стойкость, прочность и гибкость	Текучесть, сложность в постобработке
TPU	Эластичность, износостойкость, отсутствие запаха	Сложность печати, низкая прочность на сжатие
Nylon	Высокая прочность, гибкость	Сложность в печати, гигроскопичность
ASA	Устойчивость к ультрафиолету, высокая ударпрочность	Высокая термоусадка
PC	Термическая стабильность, высокая ударпрочность	Чувствительность к влаге, желтизна при длительном воздействии
HIPS	Хорошая адгезия, ударпрочность	Чувствительность к растворителям, токсичность при нагревании
PVA	Водорастворимость, нетоксичность	Низкая прочность, влажочувствительность
PEEK	Высокая термостойкость, долговечность	Высокая стоимость, сложность в печати

1) ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) – термопластичный инженерный материал, который широко используется в различных отраслях благодаря своим отличным механическим свойствам и универсальности. Он производится путем сополимеризации стирола с акрилонитрилом в присутствии бутадиенового каучука, что придает ему уникальные характеристики [6].

2) PLA (полилактид) – один из самых популярных пластиков для 3D-печати, особенно в технологии моделирования методом послойного наплавления (*Fused Deposition Modeling* – FDM). Он представляет собой термопластичный алифатический полиэфир, который производится из возобновляемых источников, таких как кукуруза, сахарный тростник и другие растительные материалы. PLA является экологически чистым и биоразлагаемым, что делает его привлекательным выбором для многих пользователей [7].

3) PETG (полиэтилентерефталатгликоль) – термопластичный полимер, который является модификацией полиэтилентерефталата (PET). Он был разработан для преодоления некоторых недостатков оригинального PET, таких как кристаллизация при медленном охлаждении. PETG сочетает в себе отличные механические свойства, устойчивость к химическим воздействиям и легкость в обработке, что делает его популярным выбором для использования в 3D-печати [8].

4) TPU (термопластичный полиуретан) – универсальный термопластичный эластомер, который сочетает в себе характеристики как пластика, так и резины. Благодаря своим уникальным свойствам TPU находит широкое применение в различных отраслях, включая 3D-печать, автомобильную промышленность, медицину и производство потребительских товаров [9].

5) Nylon (нейлон) – общее название для группы термопластичных полимеров на основе полиамидов, которые были разработаны для замены шелка. Нейлон обладает высокой прочностью, гибкостью и устойчивостью к износу, что делает его популярным материалом в 3D-печати и других промышленных приложениях [10].

6) ASA (акрилонитрилстиролакрилат) – аморфный термопластик, который является сополимером акрилонитрила, стирола и акрилата. Он был разработан как альтернатива ABS-пластику и обладает рядом уникальных свойств, которые делают его особенно подходящим для использования в условиях, требующих высокой прочности и устойчивости к внешним воздействиям [11].

7) Polycarbonate (PC) – группа термопластичных полимеров, содержащих карбонатные группы

в своей химической структуре. Поликарбонаты известны своей высокой прочностью, ударной стойкостью, прозрачностью и термальной стабильностью. Эти свойства делают поликарбонат одним из самых популярных инженерных пластиков, используемых в различных отраслях [12].

8) HIPS (High Impact Polystyrene) – термопластичный полимер, который представляет собой модифицированный полистирол с добавлением полибутадиенового каучука. Это делает HIPS более ударопрочным и гибким по сравнению с обычным полистиролом. HIPS широко используется в различных отраслях, включая 3D-печать, производство упаковки и бытовых товаров [13].

9) PVA (поливиниловый спирт) – термопластичный полимер, который обладает уникальным свойством полной растворимости в воде. Он широко используется в 3D-печати, особенно как вспомогательный материал для создания поддерживающих структур. PVA подходит для печати на FDM-принтерах с двойным экструдером, что позволяет эффективно работать с моделями сложной геометрии [14].

10) PEEK (полиэфирэфиркетон) – высокоэффективный инженерный термопласт, который принадлежит к семейству полиарилэфиркетонов (PAEK). Он обладает выдающимися механическими и термическими свойствами, что делает его идеальным выбором для применения в условиях высокой температуры и агрессивных химических сред. PEEK впервые был представлен в начале 1980-х годов и с тех пор нашел широкое применение в ряде отраслей, включая аэрокосмическую, автомобильную, медицинскую промышленность и электронику [15].

Использование пластиков в 3D-печати имеет как положительные, так и отрицательные экологические аспекты. С одной стороны, 3D-печать может снизить количество отходов по сравнению с традиционными методами производства, в том числе возможностью их переработки и использованию экологически чистых и биоразлагаемых материалов, но, с другой стороны, она также вызывает серьезные экологические проблемы [16]: процесс 3D-печати требует значительных энергетических затрат.

Необходимо отметить, что экологические аспекты использования пластиков для 3D-печати являются сложной темой, требующей отдельного рассмотрения.

В представленном исследовании изучена стабильность изделий из ряда самых распространенных пластиков в широком температурном диапазоне. Кроме этого, с целью дальнейшей проверки выполнены термические испытания приборов с отдельными компонентами, изготовленными из пластиков методом 3D-печати.

Термические испытания

Для термических испытаний были выбраны изделия, а именно корпуса приборов, изготовленные методом 3D-печати, из пластиков ABS, PLA и PC. Кроме корпусов параллельно исследовалась работоспособность системы, разработанной в СКБ «Спутник» ИРИ РТУ МИРЭА, предназначенной для выявления деформаций в протяженных объектах. Система включает в себя передатчик, излучающий лазерный луч, и приёмный модуль, состоящий из фоточувствительной матрицы, LCD-дисплея и модуля ESP32 (рис. 1). Информация о наличии деформаций передавалась в мобильное приложение пользователя и дополнительно отображалась на LCD-дисплее.

Эта система эксплуатируется на открытом воздухе с воздействием любых атмосферных факторов (климатическое исполнение УХЛ-1 – объединение умеренного и холодного макроклиматических районов, эксплуатация на открытом воздухе с воздействием любых атмосферных факторов (дождь, ливень, снег, пыль при сильном ветре). Для исследований поведения изделий из пластика при нагреве и охлаждении с помощью 3D-принтера из вышеобозначенных пластиков были напечатаны 5 корпусов, показанные на рис. 2, четыре из которых использовались как корпуса приемника системы регистрации деформаций протяженных объектов и один – передатчика.

Представленные корпуса и приборы были помещены в термальную камеру MC-812R Compact Ultra Low Temperature Chamber. В ходе испытаний проверялась работоспособность электроники и возможность использования материалов корпусов в рабочем диапазоне температур -60 до 40°C , который свойственен климатическому исполнению УХЛ-1. Первое термическое испытание проводилось в два этапа: охлаждение до температуры -30°C длительностью 2 часа, и охлаждение до температуры -60°C , также длительностью 2 часа (рис. 3). Время начала испытаний – 11:00, температура достигла -30°C к 11:20. Первая проверка пластика – 13:00.

После окончания двухчасового пребывания изделий в термальной камере был проведен визуальный осмотр пластиков и электроники. Никаких проблем в работе приемно-передающего модуля и дефектов в корпусах не обнаружено.

Дополнительно температура изделий в термокамере контролировалась с помощью тепловизора Testo 865 (рис. 4). Далее температуру понизили до -60°C . Время начала повторного испытания – 13:10.

Конец испытания – 15:10. Визуальный осмотр испытуемых изделий показал, что изделия из пластика сохранили свою форму, деформаций не обнаружено, приемно-передающий модуль остался работоспособным за исключением отображения информации на LCD-дисплее. Система пригодна для использования при температуре -60°C .

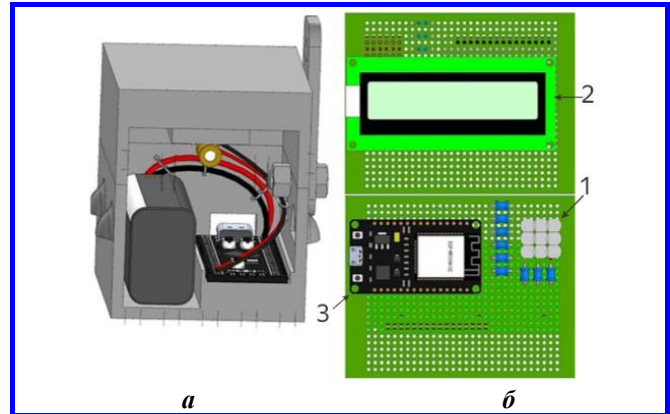


Рис. 1. Система для выявления деформаций в протяженных объектах: а – передающий модуль; б – компоненты приёмного модуля (1 – фоточувствительная матрица; 2 – LCD-дисплей; 3 – модуль ESP32)

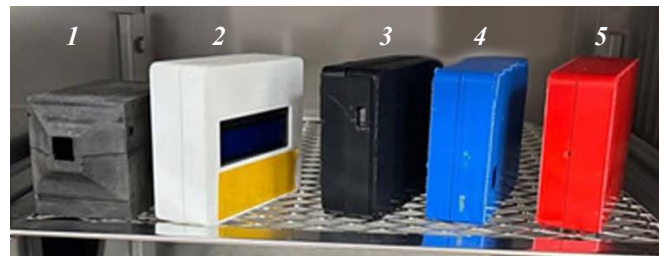


Рис. 2. Изображение изделий из пластика для испытаний в термической камере: корпус передатчика из ABS-пластика (1); корпуса приемника из ABS-пластика (с печатным узлом) (2), PC-пластика (3), ABS-пластика (4), PLA-пластика (5)



Рис. 3. Изображение интерфейса термальной камеры MC-812R Compact Ultra Low Temperature Chamber



Рис. 4. Измерение температуры изделий с помощью тепловизора Testo 865

Второе испытание проведено на следующий день. Испытуемые образцы нагревались до температуры 30°C в течение 2-х часов, и до 40°C, длительностью также 2 часа. Начало испытаний в 11:30 при температуре 20°C, в 11:35 – было зафиксировано повышение температуры до 30°C. Первая проверка изделий была осуществлена в 13:30: деформаций, трещин не обнаружено, приборы работали исправно.

Вторая проверка изделий в 15:30 также показала, что деформаций, трещин нет, все приборы исправны.

Заключение

В работе представлен краткий обзор полимеров (пластиков), используемых в аддитивных технологиях (3D-печати). Рассмотрены свойства наиболее популярных пластиков, а именно: ABS, PLA, PETG, TPU, Nylon, ASA, PC, HIPS, PVA, PEEK. Показаны их преимущества и недостатки. Проведены термические испытания изделий из пластиков при температурах от –60 до 40°C. Обнаружено отсутствие образования дефектов изделий из всех испытуемых типов пластиков. Система регистрации после термических испытаний исправно функционирует, а корпуса, выполненные из разных материалов пластиков, могут применяться при серийном изготовлении приборов.

Литература

1. Polymers for 3D printing in biomedical engineering applications / H. Desai, S. Nimish, S. Mamta [et al.]. – DOI : 10.47750/pnr.2022.13.S06.246 // Journal of Pharmaceutical Negative Results. – 2022. – Vol. 13. – Special Issue. – P. 1870–1880.
2. Nanomaterial Patterning in 3D Printing // B. Elder, R. Neupane, E. Tokita [et al.]. – DOI : 10.1002/adma.201907142 // Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32. – Iss. 17.
3. Муравский, А. А. Полимерная 3D-Печать: история, классификация и современные тенденции развития / А. А. Муравский // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2023. – № 64(90). – С. 58–66.
4. Рэдвуд, Б. 3D-печать. Практическое руководство / Б. Рэдвуд, Ф. Шоффер, Б. Гаррэт. – Москва : ДМК, 2020. – С. 17–18.
5. Ligon, S. C. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing / S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl [et al.]. – DOI : 10.1021/acs.chemrev.7b00074 // Chem. Rev. – 2017. – Vol. 117 (15). – P. 10212.
6. ABS-пластик // ООО «СБВ утилизация» : [сайт]. – Екатеринбург, 2024. – URL : <https://sbv-ekb.ru/abs-plastik.html?city=ekb>.
7. Озеров, А. Всё о PLA – самом популярном пластике для FDM-печати / А. Озеров // iQB Technologies : [сайт]. – Москва, 2024. – URL : <https://blog.iqb.ru/pla-plastic/>.
8. 3D-печать: как печатать пластиком PETG // Top 3D Shop [сайт]. – 2024. – URL : <https://top3dshop.ru/blog/petg-review-and-manual.html>.
9. Гуринович, А. TPU-пластик в 3D-печати: применение, характеристики, плюсы и минусы / А. Гуринович // ООО «АЙ ЭМ СИ КОМПЬЮТЕРС» [сайт]. – Минск, 2022. – URL : <https://igo3d.by/novosti/tpu-plastik-v-3d-pechati-primenenie-harakteristiki-plyusy-i-minusy/>.
10. Нейлон. История. Современность // Республиканская научно-техническая библиотека [сайт]. – 2023. – URL : <https://rlst.by/2023/02/22/nejlon-istoriya-sovremennost-onlajn-vystavka-patentov/>.
11. ASA-пластик для 3D печати: характеристики, применение, производители // 3DWolf : [сайт]. – Долгопрудный, 2024. – URL : <https://3dewolf.ru/news/asa-plastik-dlya-3d-pechati-harakteristiki-primenenie-proizvoditeli/>.
12. Polycarbonate Material // Ruitai Mould : [сайт]. – 2024. – URL : <https://www.rtprototype.com/what-is-polycarbonate/>.
13. HIPS: описание, параметры печати, хранение и постобработка материала // ООО «РЭК» [сайт]. – Москва, 2021. – URL : <https://rec3d.ru/rec-wiki/hips-opisanie-materiala-parametry-pechati-i/>.
14. Пластик PVA: характеристики, особенности 3D печати, применение, производители и цены // 3DWolf : [сайт]. – Долгопрудный, 2024. – URL : <https://3dewolf.ru/news/plastik-pva-harakteristiki-osobennosti-3d-pechati-primenenie-proizvoditeli-i-ceny/>.
15. Материал PEEK для 3D-печати // 3dtoday : [сайт]. – 2024. – URL : <https://3dtoday.ru/blogs/3dvision-su/material-peek-dlya-3d-pechati>.
16. Подробный гид по выбору пластика для 3D-печати // Top3dshop.ru : [сайт]. – 2018. – URL : <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati.html>.
17. Панфилова, А. Н. 3D-печать и экология / А. Н. Панфилова // Цветной мир : [сайт]. – 2021. – URL : <https://cvetmir3d.ru/blog/primenenie/3d-pechat-i-ekologiya/#title-dop1-12>.

Поступила в редакцию 01.04.2025

Вячеслав Сергеевич Иванов, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, т. +7 (906) 780-55-51, e-mail: ivanovmirea1@yandex.ru.
Александр Александрович Васильев, студент 3 курса бакалавриата, т. +7 (965) 343-19-82, e-mail: vasya992004@mail.ru.
 (Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (ИРИ, РТУ МИРЭА))
Владимир Вячеславович Шеденко, студент 1 курса магистратуры, т. +7 (901) 956-64-67, e-mail: shedenkovv@mail.ru.
Дмитрий Игоревич Фимин, студент 1 курса магистратуры, т. +7 (964) 760-58-32, e-mail: lopuhov-dima1@mail.ru.
Макар Сергеевич Христюк, студент 1 курса магистратуры, т. +7 (905) 469-37-67, e-mail: Khristuk.n15@gmail.com.
 (Передовая инженерная школа СВЧ-электроники ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (ПИИ СВЧ-электроники, РТУ МИРЭА)).

INVESTIGATION OF THE THERMAL STABILITY OF PLASTIC PRODUCTS MADE BY 3D-PRINTING

V. S. Ivanov, A. A. Vasiliev, V. V. Shedenko,
D. I. Fimin, M. S. Khristyuk

The characteristics of behavior during thermal testing of products (instrument housings) and finished instruments made of plastics by 3D printing are considered. The paper presents a comparative analysis of ten of the most active plastics: acrylonitrile butadiene styrene, polylactide, polyethylene terephthalate glycol, thermoplastic polyurethane, nylon, acrylonitrile styrene acrylate, polycarbonate, high-impact polystyrene, polyvinyl alcohol, polyesteresterketone. Their pros and cons are shown. For thermal tests, we selected instrument housings developed at the Sputnik Student Design Bureau of the Institute of Radioelectronics and Informatics of RTU MIREA, a system designed to detect deformations in extended objects made by 3D printing from plastics: acrylonitrile butadiene styrene, polylactide and polycarbonate. The conducted thermal tests at temperatures from -60 to 40 °C showed the absence of defects in products made from all types of plastics tested. Devices with elements made of tested plastics showed no functional abnormalities after thermal tests.

Key words: plastics, 3D printing, thermal testing.

References

1. Polymers for 3D printing in biomedical engineering applications / H. Desai, S. Nimish, S. Mamta [et al.]. – DOI : 10.47750/pnr.2022.13.S06.246 // Journal of Pharmaceutical Negative Results. – 2022. – Vol. 13. – Special Issue. – P. 1870–1880.
2. Nanomaterial Patterning in 3D Printing // B. Elder, R. Neupane, E. Tokita [et al.]. – DOI : 10.1002/adma.201907142 / Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32. – Iss. 17.
3. Muravsky, A. A. Polymer 3D Printing: history, classification and modern development trends / A. A. Muravsky // Izvestiya SPbGTI(TU). – 2023. – № 64(90). – P. 58–66.
4. Redwood, B. 3D printing. A practical guide / B. Redwood, F. Shoffer, B. Garret. – Moscow : DMK, 2020. – P. 17–18.
5. Ligon, S. C. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing / S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl [et. al.]. – DOI : 10.1021/acs.chemrev.7b00074 // Chem. Rev. – 2017. – Vol. 117 (15). – P. 10212.
6. ABS-plastic // LLC «SBV Utilization» : [website]. – Ekaterinburg, 2024. – URL : <https://sbv-ekb.ru/abs-plastik.html?city=ekb>.
7. Ozerov, A. All about PLA – the most popular plastic for FDM printing / A. Ozerov // iQB Technologies : [website]. – Moscow, 2024. – URL : <https://blog.iqb.ru/pla-plastic/>.
8. 3D Printing: How to Print with PETG Plastic // Top 3D Shop : [website]. – 2024. – URL : <https://top3dshop.ru/blog/petg-review-and-manual.html>.
9. Gurinovich, A. TPU plastic in 3D printing: application, characteristics, pros and cons / A. Gurinovich // IMC COMPUTERS LTD : [website]. – Minsk, 2022. – URL : <https://igo3d.by/novosti/tpu-plastik-v-3d-pechati-primenenie-harakteristiki-plyusy-i-minusy/>.
10. Nylon. History. Modernity // Republican Scientific and Technical Library: [website]. – 2023 – URL : <https://shop.plexiwire.com.ua/ru/blog/neylon-nylon-dlya-3d-druku/>.
11. ASA plastic for 3D printing: characteristics, application, manufacturers // 3DWolf : [website]. – Dolgoprudny, 2024. – URL : <https://3dwolf.ru/news/asa-plastik-dlya-3d-pechati-harakteristiki-primenenie-proizvoditeli/>.
12. Polycarbonate Material // Ruitai Mould : [website]. – 2024. – URL : <https://www.rtprototype.com/what-is-polycarbonate/>.
13. HIPS: description, printing parameters, storage and post-processing of material // LLC «REK» : [website]. – Moscow, 2021. – URL : <https://rec3d.ru/rec-wiki/hips-opisanie-materiala-parametry-pechati-i/>.
14. PVA plastic: characteristics, 3D printing features, application, manufacturers and prices // 3DWolf : [website]. – Dolgoprudny, 2024. – URL : <https://3dwolf.ru/news/plastik-pva-harakteristiki-osobennosti-3d-pechati-primenenie-proizvoditeli-i-czeny/>.
15. PEEK material for 3D printing // 3dtoday : [website]. – 2024. – URL : <https://3dtoday.ru/blogs/3dvision-su/material-peek-dlya-3d-pecati>.
16. Detailed guide on choosing plastic for 3D printing // Top3dshop.ru : [website]. – 2018. – URL : <https://www.stankoff.ru/blog/post/900>.
17. Panfilova, A. N. 3D printing and ecology / A. N. Panfilova // Tsvetnoy Mir : [website]. – 2021. – URL : <https://cvetmir3d.ru/blog/primenenie/3d-pechat-i-ekologiya/#title-dop1-12>.

Vyacheslav Sergeevich Ivanov, candidate of Technical Sciences, associate Professor of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, t. +7 (906) 780-55-51, e-mail: ivanovmirea1@yandex.ru.

Alexander Alexandrovich Vasiliev, 3rd year student bachelor's degree, t. +7 (965) 343-19-82, e-mail: vasya992004@mail.ru.
(Institute of Radioelectronics and Informatics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University» (IRI, RTU MIREA)).

Vladimir Vyacheslavovich Shedenko, 1st year graduate student in Microwave Electronics Engineering, t. +7 (901) 956-64-67, e-mail: shedenkovv@mail.ru.

Dmitry Igorevich Fimin, 1st year Master's degree student in Microwave Electronics, t. +7 (964) 760-58-32, e-mail: lopuhov-dima1@mail.ru.

Makar Sergeevich Khristyuk, 1st year Master's degree student in Microwave Electronics, t. +7 (905) 469-37-67, e-mail: Khristuk.n15@gmail.com.

(Advanced Engineering School of Microwave Electronics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University» (RTU MIREA)).