

МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ РЕСТАВРАЦИИ» (ФГБНИУ «ГОСНИИР»)

Художественное наследие.
Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

Международное сетевое рецензируемое научное издание

№4 2024

МОСКВА 2024

THE MINISTRY OF CULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION

THE STATE RESEARCH INSTITUTE FOR RESTORATION

Художественное наследие.
Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.

An international peer-reviewed online scientific journal

No 4 2024

MOSCOW 2024

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Д. Б. Антонов

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

А. С. Макарова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**А. Н. Балаш, В. В. Баранов, С. И. Баранова, Г. И. Вздорнов, В. Г. Гагарин,
М. Ф. Дубровин, В. В. Игошев, С. С. Ипполитов, С. А. Кочкин, А. В. Кыласов,
Л. И. Лифшиц, Т. К. Мкртычев, А. В. Огороков, С. А. Писарева, И. Н. Проворова,
И. Г. Равич, Н. Л. Ребрикова, Н. В. Синявина, С. В. Филатов, Н. Е. Шафажинская,
О. В. Яхонт.**

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:

О. Г. Кирьянова

РЕДАКТОР:

Г. И. Герасимова

Выходит 4 раза в год

Адрес редакции:

107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44 стр. 1

e-mail: journal@gosniir.ru

Сайт: <http://www.journal-gosniir.ru/>

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ. № ФС77-82901 ОТ 14.03.2022

ISSN 2782-5027

© ФГБНИУ «ГОСНИИР», 2024

© Авторы статей, 2024

EDITOR-IN-CHIEF:

Dmitriy B. Antonov

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Anastasia S. Makarova

EDITORIAL BOARD:

**A. N. Balash, V. V. Baranov, S. I. Baranova, G. I. Vzdornov, V. G. Gagarin, M. F. Dubrovin,
V. V. Igoshev, S. S. Ippolitov, S. A. Kochkin, A. V. Kylasov, L. I. Lifshic, T. K. Mkrttychev,
A. V. Okorokov, S. A. Pisareva, I. N. Provorova, I. G. Ravich, N. L. Rebrikova, N. V. Sinyavina,
S. V. Filatov, N. E. Shafazhinskaya, O. V. Yahont.**

EXECUTIVE SECRETARY:

O. G. Kiryanova

EDITOR:

G. I. Gerasimova

Quarterly journal

Address:

44-1, Gastello St., Moscow, Russia, 107014

e-mail: journal@gosniir.ru

Web-site: <http://www.journal-gosniir.ru/>

Mass media registration certificate EL. N° FS77-82901 from 14.03.2022

ISSN 2782-5027

© The State Research Institute
for Restoration, 2024

© Article authors, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-7-21

Азарнина Е. В.

Икона «Собор Архангелов» из Великого Устюга, XIII век: Особенности конструкции основы, техника исполнения и индивидуальные приемы мастера 7

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-22-41

Баранов В. В.

Старообрядческие иконные стилизации и имитации XIX – начала XX века и современные подделки. Технологические отличия 22

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-42-59

Гордюшина В. И., Синченко А. Д., Торопов С. Е., Рудаков В. М.

Оценка сохранности древесины настила приусадебного участка XII века из Троицкого раскопа (Великий Новгород). Рекомендации по консервации 42

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-60-73

Котельников П. Н., Кураков С. В., Самойлов В. Б.

Сравнение аддитивных способов 3D-печати прозрачных полимеров в реставрации утрат предметов политехнического типа 60

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-74-83

Нестерова А. И.

Исследование и реставрация иконы «Иоанн Златоуст» из собрания Переславль-Залесского историко-архитектурного и художественного музея-заповедника 74

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-84-93

Пивоварова Н. В.

Древнейшая икона «Собор архангелов» из Великого Устюга в собрании Русского музея: История, реставрация и исследование памятника 84

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-94-101

Ребрикова Н. Л.

Использование в качестве «зеленых» биоцидов эфирных масел. Взаимодействие их с живописными материалами 94

CONTENTS

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-7-21

Azarnina E. V.

Icon "The Meeting of the Archangels" from Veliky Ustyug, 13th century. Features of the wooden base, execution technique and individual hand of the master

7

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-22-41

Baranov V. V.

Old Believer icon stylizations and imitations of the XIX – early XX century and modern forgeries. Technological differences

22

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-42-59

Gordyushina V. I., Sinchenko A. D., Toropov S. E., Rudakov V. M.

Assessment of the preservation of the timber flooring of the 12th-century homestead from the Troitsky excavation (Veliky Novgorod). Recommendations for conservation

42

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-60-73

Kotelnikov P. N., Kurakov S. V., Samoilo V. B.

Comparison of additive methods for 3D printing transparent polymers in the restoration of polytechnic type objects

60

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-74-83

Nesterova A. I.

Research and restoration of the icon "John Chrysostom" from the collection of the Pereslavl-Zalesky museum-reserve

74

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-84-93

Pivovarova N. V.

Ancient icon "The Meeting of the Archangels" from Veliky Ustyug in the collection of the Russian museum: History, restoration and research of the monument

84

DOI: 10.24412/2782-5027-2024-4-94-101

Rebrikova N. L.

The use of essential oils as "green" biocides. Their interaction with painting materials

94

П. Н. Котельников, С.В. Кураков, В. Б. Самойлов

СРАВНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ СПОСОБОВ 3D-ПЕЧАТИ ПРОЗРАЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ В РЕСТАВРАЦИИ УТРАТ ПРЕДМЕТОВ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ТИПА

Современная химическая промышленность предлагает большой выбор композиционных полимерных материалов для аддитивных технологий 3D-печати. Появляются новые структурные решения и новые химические формулы для пластиков (пластмасс). К последним относится современная группа материалов для получения прозрачных моделей при 3D-печати. В статье приводится сравнение двух способов аддитивных технологий применительно к реставрации утрат музейных предметов (политехнического типа), когда была полностью восстановлена функциональность старинного механизма, при этом сохранен принцип обратимости в реставрации. Авторы выделяют основные критерии, влияющие на качество и точность получаемых аддитивных изделий, и рассматривают вопросы выбора оптимальных режимов формообразования методами 3D-печати и пост-аддитивной обработки (шлифование, полирование, лакокрасочное покрытие). В последнее время растет интерес музейных работников, искусствоведов и культурологов к изучению возможностей, которые предлагают новые технологии применительно к музейному пространству и экспозиционным решениям. Несомненно, способы создания прозрачных изделий и моделей позволят посетителям и музейным специалистам по-новому взглянуть на экспонат и / или его части, например, получить точное представление об утраченной форме музейного предмета. В статье авторы выделяют перспективные направления использования продукции аддитивных технологий в музейном пространстве в виде наглядных моделей, арт-объектов, копий, дубликатов и др. Работа по восстановлению утрат музейных экспонатов политехнического типа потребовала высокого междисциплинарного взаимодействия между различными специалистами как технической, так и гуманитарной сфер науки, образования и культуры, и авторы полагают, что опыт, представленный в этой статье, будет интересен широкому кругу читателей. Предлагаемый материал публикуется впервые.

Ключевые слова: аддитивные технологии в реставрации, 3D-печать, музейные экспонаты политехнического типа, фотополимерный пластик, прозрачность, параметры светопрозрачности, освещенность.

P. N. Kotelnikov, S. V. Kurakov, V. B. Samoilov

COMPARISON OF ADDITIVE METHODS FOR 3D PRINTING TRANSPARENT POLYMERS IN THE RESTORATION OF POLYTECHNIC TYPE OBJECTS

The modern chemical industry offers a large selection of composite polymer materials for additive 3D printing technologies. New structural solutions and new chemical formulas for plastics are emerging. This type includes a modern group of materials for producing transparent models in 3D printing. The article provides a comparison of two methods of additive technologies in relation to the restoration of losses of museum objects (polytechnic type), when the functionality of the ancient mechanism was completely restored, while maintaining the principle of reversibility in restoration. The authors highlight the main criteria that influence the quality and accuracy of the resulting additive products and consider the issues of choosing optimal shaping modes using 3D printing and post-additive processing (grinding, polishing, paint coating). In recent years, there has been a growing interest among museum staff, art historians and cultural experts in exploring the possibilities offered by new technologies in relation to museum space and exhibition solutions. Undoubtedly, methods of creating transparent products and models will allow visitors and museum specialists to take a fresh look at the exhibit and / or its parts, for example, to obtain an accurate idea of the lost form of a museum object. In the article, the authors highlight promising areas for using additive technology products in the museum space in the form of visual models, art objects, copies, duplicates, etc. The work of restoring the loss of polytechnic museum exhibits required high interdisciplinary interaction between various specialists, both technical and humanitarian

fields of science, education and culture, and the authors believe that the experience shown in this article will be of interest to a wide range of readers. The proposed material is published for the first time.

Keywords: additive technologies in restoration, 3D printing, polytechnic museum exhibits, photopolymer plastic, transparency, light transmittance parameters, luminosity.

Во вступительной части статьи мы вернемся к реставрации и восстановлению работоспособности политехнического объекта «Модель планетарного механизма с коническими и цилиндрическими зубчатыми колесами» (кат. номер Н-07) из коллекции Музея МГТУ им. Н. Э. Баумана и напомним читателю следующее. По мнению директора ФГБНИУ «ГОСНИИР» Д. Б. Антонова¹, интересно было бы изготовить прозрачную шестерню, взамен утраченной: с одной стороны, механизм обретет свои передаточные функции, а с другой стороны — прозрачный элемент не будет визуально мешать осмотру экспоната посетителями музея, понимающими при этом, какое оригинальное звено отсутствует. В целом, эта достаточно изящная идея в вопросах реставрации предметов политехнического типа навела авторов на мысль поискать подобные решения в сегменте аддитивных технологий и 3D-печати фотополимерных и других прозрачных пластмасс. В конечном итоге наша совместная работа позволила выбрать оптимальные режимы формообразования прозрачных изделий и сравнить полученные результаты.

Сложность изготовления зубчатой шестерни модели механизма "Doppelaxendrehung"² современными способами механической обработки заключается в отсутствии подходящего инструмента и оборудования — строгальные станки с делительной машиной³ для обработки зубьев уже давно стали техническим анахронизмом и представлены разве что в музеях науки и техники. Поэтому применение аддитивных технологий на сегодняшний день предоставляет реставратору политехнических предметов возможность наиболее точно и последовательно воссоздать утраченный элемент, опираясь на научные исследования и расчеты. Так, при создании цифровой CAD-модели зубчатой шестерни использовалось сочинение немецкого инженера Е. Ф. Шолля «Практическое наставление для обращения с паровыми машинами»⁴, существенно переработанное и дополненное переводчиком — Адольфом Андреевичем Розенкампом, вторым директором Ремесленного учебного заведения (МРУЗ) при Императорском Московском Воспитательном Доме (ил. 1). Фактически мы обратились к первому изданному в России (1852) техническому справочнику по паровым машинам, агрегатам и их узлам.

При наличии цифровой модели утраченного элемента мы остановили свой выбор на двух доступных технологиях 3D-печати: FDM (fused deposition modeling — технология послойного наплавления) и LCD (фотополимеризация с помощью ЖК-экрана), использованных нами ранее⁵. Остановимся на основных особенностях этих аддитивных процессов, материалах, режимах получения прозрачного изделия и постобработке аддитивной продукции.

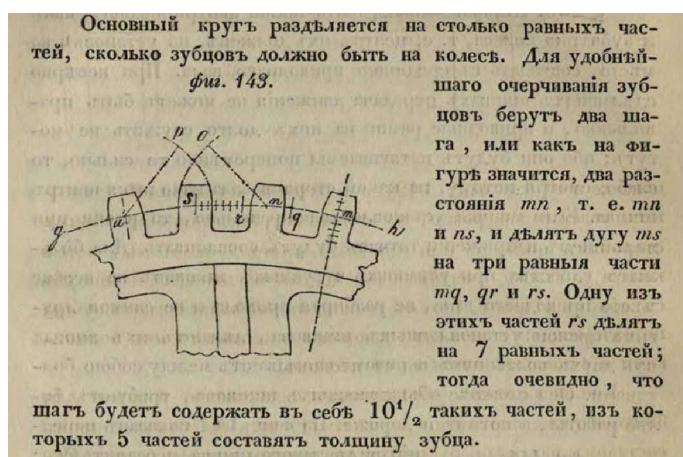
Так как под термином «прозрачность» изделия мы понимаем способность предмета пропускать свет через материал без заметного рассеяния света, то в этом случае нам придется рассмотреть вопросы формирования однородной внутренней структуры аддитивного отпечатка, создания наружной поверхности детали

с заданными параметрами поверхностного слоя, применения пластика с определенными физико-механическими и оптическими свойствами. Формирование сплошного внутреннего объема будет связано с параметрами, как собственно, отдельных линий и слоев затвердевшего пластика, так и во взаимном расположении их по отношению друг к другу.



нию *cd*, и основной кругъ зубцовъ, или линію *gh*. Потомъ дѣлать шагъ зубцовъ или пространство *mn* (см. фиг. 136), соединяющее центры двухъ зубцовъ, на 13 равныхъ частей; отъ точекъ *m* и *n* откладываютъ съ каждой стороны для толщины зубцовъ по 3 части, посему толщина каждаго зуба равняется $\frac{6}{13}$, а промежутокъ между ними $\frac{7}{13}$ частямъ шага. По сдѣланіи върнаго дѣ-

a)



Основной кругъ раздѣляется на столько равныхъ частей, сколько зубцовъ должно быть на колесѣ. Для удобнѣйшаго очерчиванія зубцовъ берутъ два шага, или какъ на фигурѣ значится, два разстоянія *mn*, т. е. *mn* и *ns*, и дѣлятъ дугу *ms* на три равныя части *mq*, *qr* и *rs*. Одну изъ этихъ частей *rs* дѣлятъ на 7 равныхъ частей; тогда очевидно, что шагъ будетъ содержать въ себѣ $10\frac{1}{2}$ такихъ частей, изъ которыхъ 5 частей составятъ толщину зуба.

b)

Ил. 1.

Фрагменты расчетов периодического профиля зубчатых колес середины XIX века: а) передачи с мелким зубом; б) составные нагруженные зацепления. Чертежи выполнены в рельефе по дереву воспитанниками МРУЗ для типографии Московского университета (примечание А. А. Розенкампа).
Архив музея МГТУ им. Н. Э. Баумана

Для FDM-технологии послойного наплавления был выбран прозрачный пластик PETG — производный от пластика PET (ПЭТ — полиэтилентерефталат), его сополимер. Эти пластики в настоящее время используются практически повсеместно, начиная тарой для химических веществ и заканчивая бутылками с водой и детскими игрушками. О безопасности использования ПЭТ-пластиков говорит тот факт, они совместимы с пищевыми продуктами и могут без проблем контактировать с ними.

ПЭТ является универсальным материалом. Но у него есть недостатки. Он является хорошей базой для производства синтетических волокон. Но он не будет работать там, где требуются термопласты. Это процессы экструзии и литья под давлением. Вот тут-то и используется модифицированный гликоль, то есть PETG. Этот пластик стал бюджетным решением для 3D-печати, так как этот материал сумел соединить в себе положительные характеристики других полимеров — ABS (сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирола) и PLA (биополимер полилактид), применяемых в 3D-печати. PETG имеет достаточную прочность, высокую пластичность и гибкость, относительно низкий коэффициент усадки⁶, хорошие адгезионные свойства, малую вероятность расслаивания и деформации в ходе печати, отсутствие неприятного запаха во время процесса послойного наплавления. Пластик прекрасно противостоит различному воздействию со стороны окружающей среды. Материал характеризуется стойкостью к растворителям, ветру, дождю, ультрафиолету.

Как достигается прозрачность материала? Многие ошибочно считают, что в гомополимер ПЭТ с основой из терефталевой кислоты просто добавляется гликоль, но это не так, ведь гликоль (синоним «диола») уже является частью реакции полимеризации самого ПЭТ. На самом деле модификация заключается в том, что в цепи

полимера часть этиленгликоля заменяют на другой мономер. В результате получается сополимер, отличающийся по своим характеристикам от гомополимера. PETG подразумевает сомономером другой диол — это циклокесандиметанол (CHDM). От добавления молекулы CHDM в остатках терефталевой кислоты увеличиваются промежутки. Это в свою очередь приводит к тому, что совместное прилегание соседних цепей полимера затрудняется. Вот именно так и получается прозрачный пластик, который характеризуется низкой температурой плавления в сравнении с ПЭТ. Новый модифицированный пластик PETG можно подвергать формовке, пресовке и он стал хорошим бюджетным решением для 3D-печати.

Применение FDM-способа послойного наплавления пластика для формирования заданного объема аддитивной детали (отпечатка) подразумевает использование механизмов для процесса плавления пластика, его выдавливания с определенным объемным расходом и движений по нескольким координатам с определенной точностью и скоростью. Печать прозрачных объектов методом FDM в основном зависит от трех ключевых факторов: экструзии достаточного количества материала, передачи достаточного количества тепла (энергии) в новый материал и высоты слоя⁷. Эти показатели мы принимаем за базовый режим FDM-печати, выделяя основные уровни и интервал варьирования.

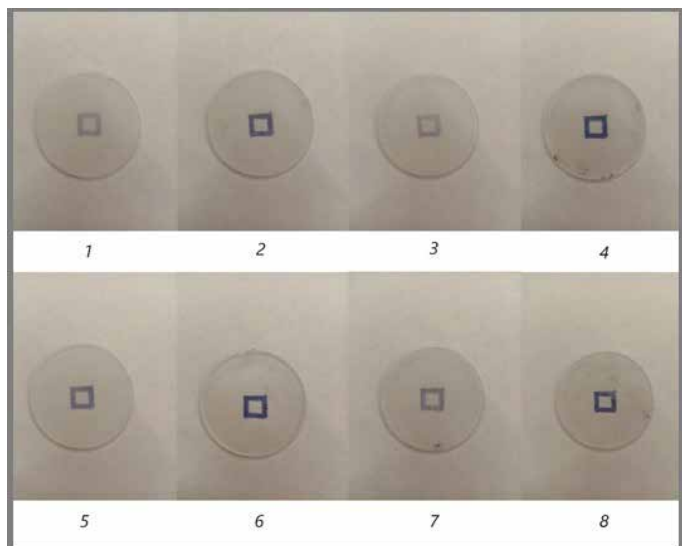
Слишком горячая печать (высокая температура наплавления) приводит к появлению крошечных пузырьков внутри отпечатка, а также может привести к тому, что деталь станет немного желтоватой, мутной. Увеличивается вероятность нарушения геометрии объекта вследствие повышения усадки пластика. При слишком холодной печати края линий, формирующих слой, не соединяются должным образом и отображаются в виде белых полос⁸. За основной уровень температуры печати принимаем $t = +250^{\circ}\text{C}$, интервал варьирования $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Слишком большая экструзия материала может повлечь за собой неточность размеров и далее выпуклости на поверхности отпечатка, что нежелательно, ведь последующая возможная доработка геометрии детали механическими методами может привести к потере прозрачности. Базовый уровень экструзии печати выбираем $\varepsilon = 105\%$, интервал варьирования $\pm 5\%$.

Высота слоя h напрямую связана с количеством слоев в детали, а значит нахождения пустых пространств между ними вследствие ошибок работы 3D-принтера. От показателя h зависит скорость печати, качество поверхности и геометрические характеристики точности аддитивной детали. За основной уровень высоты слоя $h = 0,15$ мм, интервал варьирования $\pm 0,05$ мм.

Для получения математической модели процесса согласно композиционному плану первого порядка было напечатано восемь (3^2-1) образцов в виде дисков радиусом 20 мм и толщиной 2 мм (ил. 2а). Каждый образец имел отклонения от основных уровней режима печати в пределах интервала варьирования, кроме последнего образца с нормальными показателями ($t = +250^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 105\%$; $h = 0,15$ мм). Для испытаний на прозрачность к диску вплотную прислонялся источник света с силой светового потока 10 000 Лм и на расстоянии 50 мм выполнялись измерения его уменьшения. Максимальное значение пропускания светового потока оказалось у образца №6 со значениями режима ($t = +250^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 105\%$; $h = 0,10$ мм). Была составлена математическая модель зависимости прозрачности отпечатка от параметров режимов печати, проведена оценка адекватности и воспроизводимости процесса. Итогом

стала печать зубчатого колеса (ил. 2б) с максимальным показателем прозрачности для данного аддитивного способа и PETG-пластика.



а)



б)

Ил. 2.

Аддитивные изделия из PETG-пластика, полученные при помощи FDM-печати: а) тестовые образцы с различными показателями режима наплавления; б) напечатанная зубчатая шестерня с максимальным уровнем прозрачности. Фото авторов

Вторым способом 3D-печати была выбрана аддитивная технология фотополимеризации LCD (Liquid-Crystal Display — с помощью ЖК-экрана). В фотополимерных принтерах этого типа используются жидкокристаллические панели со светодиодной подсветкой для отверждения смолы аналогично оборудованию на базе технологии DLP (Digital Light Processing — цифровая обработка света, где при помощи проектора формируется поток излучения для полимеризации слоя жидкого пластика). Как и в случае с DLP, LCD-печать заключается в одновременной засветке целых слоев для отверждения фотополимера, но без применения тысячи мельчайших зеркал, называемых цифровыми микрзеркальными устройствами (digital micromirror devices, DMD), направляющими световую проекцию. Вместо этого мощные жидкокристаллические панели излучают на модель свет с помощью светодиодов. ЖК-панель блокирует засветку в тех областях, которые не подлежат фотополимеризации. Жидкокристаллический экран пропускает свет только через участки, подлежащие отверждению, на готовую деталь, упрощая процесс и устраняя необходимость в каких-либо зеркалах или гальванометрах.

Фотополимерная 3D-печать известна как один из самых точных аддитивных процессов, и даже бюджетные LCD-принтеры способны создавать сложные геометрические формы, с которыми технологии типа FDM не могут сравниться, прежде

всего из-за значения минимальной толщины слоя — от 0,01 мм при фотополимеризации против 0,05 – 0,40 мм у способов послойного наплавления.

При выборе материала следует знать, что некоторые фотополимерные составы подходят одновременно и для DLP-, и для LCD-принтеров. Но так происходит не всегда. Одни производители оборудования обеспечивают открытую систему материалов (т. е. использование любых сторонних фотополимеров), а другие ограничивают их использование своими фирменными материалами.

Мы выбрали прозрачный пластик новой серии eResin-PLA (Polylactic Acid — полимолочная кислота) на основе растительного сырья. Производитель относит смолу для фотополимерной печати eResin-PLA к флагманам среди фотополимерных смол на био-основе.

К достоинствам пластиков eResin-PLA нужно отнести высокую прочность и твердость; устойчивость к царапинам, хорошую влагостойкость; безопасность (благодаря растительной основе eResin-PLA отлично подходит для быстрого прототипирования посуды, игрушек, инструментов), универсальность применения, плавную печать благодаря высокой стабильности и надлежащей твердости материала.

Пластик eResin-PLA был разработан для повышения скорости фотополимерной печати, сокращения времени отверждения и максимально возможного повышения эффективности печати на LCD-принтерах.

Печать прозрачных объектов методами фотополимеризации в целом зависит от двух факторов: высоты слоя (h) и угла наклона (θ) аддитивного образца. Эти показатели мы принимаем за базовый режим LCD-печати, выделяя основные уровни и интервал варьирования.

Для создания математической модели использовался полный факторный план 3×3 , который включал все возможные комбинации основных уровней ($h = 10 \text{ мкм}/55 \text{ мкм}/100 \text{ мкм}$ и $\theta = 0^\circ/45^\circ/90^\circ$), что составляет 9 экспериментальных точек. Были напечатаны образцы — диски диаметром 40 мм и толщиной 2 мм, которые, в отличие от FDM-образцов, были отполированы и покрыты слоем высокоглянцевого акрилового лака "Vorma" (ил. 3).

В результате замеров параметров освещенности и яркости был выбран лучший режим LCD-печати, с $h = 55 \text{ мкм}$ и $\theta = 0^\circ$, который применили для изготовления деталей шестерни (ил. 4).

Рассматривая вопросы постаддитивной обработки напечатанных деталей FDM- и LCD-способами, следует отметить низкую способность PETG-пластиков к механической шлифовке и полировке в отличие от прозрачного пластика eResin-PLA, который в обработке ведет себя как органическое стекло (оргстекло), или полиметилметакрилат (ПММА) — акриловая смола, синтетический термопластичный виниловый полимер. Образцы из PETG-пластика при шлифовке могут расслаиваться, ворситься, они подвержены внезапному разрушению, натяжению, короблению, как и любые другие материалы на основе текстиля, легко загрязняются абразивными продуктами и теряют эстетический вид.

Добиться гладкой полированной поверхности у детали после FDM-печати PETG-пластика — трудная, довольно непростая задача. Вместо механической обработки рекомендуется использовать ряд растворителей, таких как метилэтилкетон,

толуол или циклогексанон, но оптимальным вариантом в плане сочетания эффективности, доступности и безопасности является дихлорметан. Необходимо иметь в виду, что, хотя дихлорметан не так опасен, как некоторые альтернативные растворители, это все равно летучая и довольно токсичная жидкость, к тому же считающаяся канцерогеном, а потому при работе с дихлорметаном необходимо соблюдать строгую технику безопасности — хорошо проветривать помещение и использовать защитную одежду и очки. Наличие вытяжки — безусловный плюс. Лучше всего дихлорметан наносится кистью, так как окунание детали в растворитель может привести к чрезмерной потере детализации. Большое количество растворителя, длительное время воздействия реагента оказывает негативное влияние — поверхность становится матовой, «молочной», зернистой, в ряде случаев пластик сильно желтеет и, как следствие, теряется прозрачность, ухудшается светопропускание образца.



a)



б)

Ил. 3.

Аддитивные изделия из пластика eResin-PLA, полученные при помощи LCD-печати: а) тестовые образцы с различными показателями режима фотополимеризации; б) образцы после полировки и покрытия высокоглянцевым лаком "Borma". Фото авторов



Ил. 4.

Аддитивные детали шестерни, фланцевой шайбы и цилиндрической шпонки из прозрачного пластика eResin-PLA без шлифовки и полировки, напечатанные при помощи LCD-принтера. Фото авторов

Детали из PETG-пластика можно сглаживать оплавлением. Для этого поверхность изделия необходимо нагреть горячим воздухом, используя паяльный / строительный фен. Температура горячего воздуха должна приблизительно равняться температуре плавления полимера, то есть порядка 250°C . Необходимо расплавить (подплавить) поверхностный слой, при этом избегая чрезмерного нагревания, что может привести к деформации модели. Тепловая обработка не подходит для высокодетализированных изделий, так как мелкие детали неизбежно потеряют форму. Обрабатывать поверхность следует плавными движениями фена из стороны в сторону, периодически вращая модель и стараясь сохранять одну и ту же дистанцию, — это поможет добиться более стабильных, равномерных результатов.

Поверхность деталей из PETG-пластика в целом плохо обрабатывается лакокрасочными покрытиями. На механические детали (как в нашем случае) покрытия наносить не стоит, так как они все равно, скорее всего, разрушатся под нагрузкой. Лакировать или красить PETG-пластик стоит только после деликатного шлифования, так как полученная шероховатость помогает удерживать покрытия на месте. Перед лакированием или покраской поверхность настоятельно рекомендуется загрунтовать.

В отличие от PETG-пластика изделия из PLA после фотополимерной печати хорошо шлифуются и полируются. Важно помнить, что полилактид весьма легкоплавок. Температура размягчения PLA составляет всего 50°C , а трение при шлифовании вырабатывает тепло, так что при шлифовании поверхность модели можно перегреть, и тогда она «поплывет». Это может случиться даже при ручном шлифовании, поэтому рекомендуется смачивать абразив от начала до конца обработки, чтобы предотвратить повреждение детали от трения и нагрева и сохранить наждачную бумагу в чистоте. Начальная зернистость абразива зависит от высоты слоя и качества LCD-печати. Для детали с высотой слоя от 0,2 мм и менее можно начинать шлифование с зернистости абразива 450 – 500 грид, постепенно и последовательно заменяя шлифовальную бумагу на более тонкую 600/800/1000/1200/1500/2000/2500 грид. Финишная обработка PLA-пластика проводилась с мелкодисперсной полировальной пастой при частоте вращения войлочного круга не более 100 – 150 об/мин.

После механической обработки и очистки поверхности образцы и деталь были покрыты лаком на акриловой основе "Borma" с глянцевым уровнем блеска 90. Покрытие улучшает качество поверхности PLA-пластика, заполняет микронеровности, оставшиеся после механической обработки, оно устойчиво к световому и атмосферному воздействию. Однако надо помнить, что светопрозрачность при любом покрытии немного снижается, так как даже высококачественный лак не имеет 100%-ную прозрачность.

В результате постаддитивной обработки деталей, напечатанных FDM- и LCD-способами печати, и их сборки мы получили две прозрачные шестерни с одинаковыми размерами (ил. 5).



Ил. 5. Прозрачные шестерни, выполненные FDM- (слева) и LCD- (справа) способами аддитивной 3D-печати из PETG и eResin-PLA пластиков соответственно. Фото авторов

Замеры параметров освещенности и яркости у двух изделий производились прибором «ТКА-ПМ (02)» при базовой освещенности 280 лк и яркости 150кд/м² на горизонтальной плоскости нормирования 80 см от пола (Г-0,8). Результаты измерений (табл. 1) показали, что бюджетный вариант FDM-печати из недорогого PETG-пластика (около 1800 руб/кг) немного превосходит по показателям прозрачности более дорогой PLA-образец (около 3800 руб/кг), напечатанный LCD-способом фотополимерной печати.

Таблица 1. Результаты измерения параметров прозрачности двух деталей, напечатанных FDM- и LCD- способами.

№ п/п	Наименование показателя прозрачности	PETG – пластик (FDM)	eResin-PLA (LCD)
1	Освещенность, лк ($\delta = \pm 8 \%$) ⁹	130	95
2	Коэффициент пропускания	0,46	0,34
3	Яркость, кд/м ² ($\delta = \pm 10 \%$)	60	52
4	Коэффициент яркости	0,40	0,35

Основные сравнительные выводы по применению аддитивных технологий в процессе создания прозрачных объектов можно сформулировать следующим образом:

- оба способа печати и выбранные материалы вполне применимы для своих целей и задач по достижению прозрачности, малозаметности, сменяемости и обратимости вновь изготовленного предмета в качестве замены утраченных элементов;
- вместе с тем, прозрачные пластиковые объекты обладают достаточной прочностью и твердостью, чтобы реализовать утраченный функционал в музейных предметах политехнического типа (ил. 6);
- реально достижимая на сегодняшний день аддитивными способами прозрачность пластиковых изделий в 40 – 50% от полной проницаемости объекта может быть повышена до 70 – 80% путем применения более дорогостоящих материалов и способов 3D-печати;
- современные пластики безопасны, инертны, биоразлагаемы, имеют достаточную защиту от ультрафиолетового воздействия солнечного света, перепадов температуры и влажности;
- достигнутые результаты достаточно информативно и наглядно показывают перспективу применения прозрачных пластиков в музейном пространстве¹⁰ — для моделирования экспозиционных и выставочных композиций, в качестве тактильных моделей, поддерживающих конструкций, суппортов при инсталляциях и пр.;
- неполная прозрачность объектов объясняется большим количеством слоев предмета при 3D-печати, ошибками и неточностью перемещения исполнительных механизмов и узлов принтера, физическими свойствами пластиков.

Альтернативой аддитивным способам получения прозрачных объектов может являться литьё синтетических акриловых и эпоксидных смол в форму с последующей вакуумизацией, 3D-фрезерование и другие технологические процессы. Однако возможности проектирования, моделирования, сканирования для построения математической модели утраченного фрагмента в единичном, штучном экземпляре делают аддитивные технологии экономически обоснованными и привлекательными, иногда — единственно возможными.

В завершение хотелось бы отметить, что на всех этапах нашей работы привлекались студенты МГТУ им. Н. Э. Баумана различных кафедр и курсов¹¹, — аддитивные технологии 3D-печати достаточно новые и наукоемкие процессы. Можно сказать, что в результате такого сотрудничества и сотворчества¹² возникает высокий синергетический эффект: студенты получают и осваивают новые знания, навыки, возможность последующего трудоустройства по выбранному направлению подготовки, преподаватели и педагогические работники — адекватную независимую оценку и возможность коррекции своего учебного курса, реставраторы — новые современные подходы и адаптированные технологические режимы, которые отвечают жестким нормам и требованиям, применяемым в реставрации.



а)



б)

Ил. 6.

Восстановленное зацепление «Модели планетарного механизма с коническими и цилиндрическими зубчатыми колесами». Музей МГТУ им. Н. Э. Баумана, кат. номер Н-07. Прозрачные шестерни, выполненные FDM- (а) и LCD- (б) способами 3D-печати. Фото авторов

Примечания

1. Базанчук Г. А., Кураков С. В., Котельников П. Н. Применение аддитивных технологий в реставрации предметов политехнического типа с периодическим зубчатым профилем // Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. Международное сетевое рецензируемое научное издание. М. : ГОСНИИП, 2024. №1 (9). С. 14. — EDN LTFBSW.

2. Redtenbacher F.J. Die Bewegungs-Mechanismen // Cornell University Library: [Электронный ресурс]. — URL: <https://hdl.handle.net/1813/58737> (дата обращения: 13.01.2024).

3. Базанчук Г. А. и др. Процесс обучения ремеслам в МРУЗ в середине XIX в. как зарождение и начало формирования «Русского метода подготовки инженеров» / Г. А. Базанчук, Е. Б. Гартиг, С. В. Кураков, П. М. Шкапов // Фундаментальные и прикладные задачи механики: Материалы МНК. В 2-х ч. Москва, 07 – 10 декабря 2021 года / Сост. П. М. Шкапов, М. И. Дьяченко. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. Т. 2. С. 201. — EDN ВТАКУУ.

4. Архив Музея МГТУ им. Н. Э. Баумана. Вспомогательные материалы. Фонд ВМ – 987. «Практическое наставление для обращения с паровыми машинами. Ручная книга для зрителей машин, фабрикантов, заводчиков и винокуров.» авт. Шолль. — М. : Унив. тип., 1852. Репринт.

5. *Котельников П. Н., Кураков С. В., Морозов В. В.* Возможности применения аддитивных технологий при восстановлении утраченных элементов в реставрации предметов из металла // *Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. Международное сетевое рецензируемое научное издание.* М. : ГОСНИИР, 2023. №3 (7). С. 38. — EDN MHNYSW.

6. *Самойлов В. Б.* Термоэлектрическая система охлаждения зоны затвердевания при печати на 3D-FDM-принтере // *Ремонт. Восстановление. Модернизация.* 2019. №4. С. 14. — DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-13-16. — EDN IPCPRZ.

7. *Дальская Г. Ю., Вега В.* Влияние технологических режимов 3d-печати на физико-механические свойства изделий из PLA и PETG // *Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023): Сб. докл. Национальной НТК с международ. участием Ин-та перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА.* Москва, 10 –15 апреля 2023 года / Под ред. А. Н. Юрасова. М. : МИРЭА – РТУ, 2023. Т. 1. С. 311. — EDN MEOZON.

8. *Шабалдин А. П.* Изучение и определение пьезооптических свойств PETG-пластика // *Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: Сб. науч. ст.* Гродно : ГрГУ, 2021. С. 182. — EDN IAEJVE.

9. *Комшин А. С., Обухов И. В., Сырицкий А. Б.* О возможности оценки постоянной составляющей систематической погрешности средств измерений посредством обработки результатов измерений // *Приборы.* 2016. №2 (188). С. 26. — EDN VMGEXX.

10. *Базанчук Г. А., Кураков С. В., Малолетнева И. В.* «Театрум Махинарум, то есть Ясное зрелище махин» как концептуальная модель цифровизации в современном музейном пространстве // *История науки и техники. Музейное дело. (Ре)конструкция научных практик прошлого и настоящего: Материалы XVI Международ. науч.-практич. конф.* Москва, 14 – 15 декабря 2022 года. М. : Политехнич. музей, 2023. С. 422. — EDN BWKTZA.

11. *Самойлов В. Б.* Проектно-ориентированный подход при подготовке студентов кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана // *Инновационные технологии реновации в машиностроении : Сб. тр. Международ. науч.-технич. конф., посвящённой 150-летию ф-та «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана.* Москва, 04 – 05 февраля 2019 года / под общ. ред. В. Ю. Лавриненко. М. : Московский гос. обл. ун-т, 2019. С. 455 – 456. — EDN ZBJVFB.

12. *Базанчук Г. А., Кураков С. В.* Элементы проблемного обучения с использованием междисциплинарных гуманитарных связей в традиционном курсе технического предмета // *Международное сотрудничество вузов государств – участников Содружества Независимых Государств. Роль технических университетов в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ: сб. науч. ст.* М. : Ассоц. технич. ун-тов, 2021. С. 139. — EDN TNMNVС.

1. *Bazanchuk G. A., Kurakov S. V., Kotel'nikov P. N.* Primenenie additivny`x texnologij v restavracii predmetov politexnicheskogo tipa s periodicheskim zubchaty`m profilom

// Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. Mezhdunarodnoe setevoe recenziruemoje nauchnoje izdanie. M. : GOSNIIR, 2024. №1 (9). S. 14. — EDN LTFBSW.

2. *Redtenbacher F.J.* Die Bewegungs-Mechanismen // [E`lektronnyj resurs]: Cornell University Library. — URL: <https://hdl.handle.net/1813/58737> (data obrashheniya: 13.01.2024).

3. *Bazanchuk G. A. i dr.* Process obucheniya remeslam v MRUZ v seredine XIX v. kak zarozhdenie i nachalo formirovaniya «Russkogo metoda podgotovki inzhenerov» / G. A. Bazanchuk, E. B. Gartig, S. V. Kurakov, P. M. Shkapov // Fundamental`ny`e i prikladny`e zadachi mexaniki: Materialy` MNK. V 2-x ch. Moskva, 07 – 10 dekabrya 2021 goda / Sost. P. M. Shkapov, M. I. D`yachenko. M. : MGTU im. N.E`. Baumana, 2021. T. 2. S. 201. — EDN BTAKUU.

4. Arxiv Muzeya MGTU im. N. E`. Baumana. Vspomogatel`ny`e materialy`. Fond VM – 987. «Prakticheskoe nastavlenie dlya obrashheniya s parovy`mi mashinami. Ruchnaya kniga dlya smotritelej mashin, fabrikantov, zavodchikov i vinokurov.» avt. Sholl`. — M. : Univ. tip., 1852. Reprint.

5. *Kotel`nikov P. N., Kurakov S. V., Morozov V. V.* Vozmozhnosti primeneniya additivny`x tehnologij pri vosstanovlenii utrachenny`x e`lementov v restavracii predmetov iz metal-la // Xudozhestvennoe nasledie. Issledovaniya. Restavraciya. Xranenie. Art Heritage. Research. Storage. Conservation. Mezhdunarodnoe setevoe recenziruemoje nauchnoje izdanie. M. : GOSNIIR, 2023. №3 (7). S. 38. — EDN MHNYSW.

6. *Samojlov V. B.* Termoe`lektricheskaya sistema oxlazhdeniya zony` zatverdevaniya pri pechati na 3D-FDM-printere // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2019. №4. S. 14. — DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-13-16. — EDN IPCPRZ.

7. *Dal`skaya G. Yu., Vega V.* Vliyanie texnologicheskix rezhimov 3d-pechati na fiziko-mexanicheskie svojstva izdelij iz PLA i PETG // Perspektivny`e materialy` i tehnologii (PMT-2023): Sb. dokl. Nacional`noj NTK s mezhdunarod. uchastiem In-ta perspektivny`x tehnologij i industrial`nogo programirovaniya RTU MIRE`A. Moskva, 10 –15 aprelya 2023 goda / Pod red. A. N. Yurasova. M. : MIRE`A – RTU, 2023. T. 1. S. 311. — EDN MEOZON.

8. *Shabaldin A. P.* Izuchenie i opredelenie p`ezoopticheskix svojstv PETG-plastika // Tradicii, sovremennye problemy` i perspektivy` razvitiya stroitel`stva : Sb. nauch. st. Grodno : GrGU, 2021. S. 182. — EDN IAEJVE.

9. *Komshin A. S., Obuxov I. V., Sy`riczkij A. B.* O vozmozhnosti ocenki postoyannoj sostavlyayushhej sistematicheskoy pogreshnosti sredstv izmerenij posredstvom obrabotki rezul`tatov izmerenij // Pribory`. 2016. №2 (188). S. 26. — EDN VMGEXX.

10. *Bazanchuk G. A., Kurakov S. V., Maloletneva I. V.* «Teatrum Maxinarum, to est` Yasnoe zrelishe maxin» kak konceptual`naya model` cifrovizacii v sovremennom muzejnom prostranstve // Istoriya nauki i texniki. Muzejnoe delo. (Re)konstrukciya nauchny`x praktik proshlogo i nastoyashhego: Materialy` XVI Mezhdunarod. nauch.-praktich. konf. Moskva, 14 – 15 dekabrya 2022 goda. M. : Politeknich. muzej, 2023. S. 422. — EDN BWKTZA.

11. *Samojlov V. B.* Proektno-orientirovannyj podxod pri podgotovke studentov kafedry` «Texnologii obrabotki materialov» MGTU im. N. E`. Baumana // Innovacionny`e

tehnologii renovacii v mashinostroenii : Sb. tr. Mezhdunarod. nauch.-texnich. konf., posvyashyonnoj 150-letiyu f-ta «Mashinostroitel'ny'e tehnologii» i kafedry «Tehnologii obrabotki materialov» MGTU im. N. E. Baumana. Moskva, 04 – 05 fevralya 2019 goda / pod obshh. red. V. Yu. Lavrinenko. M. : Moskovskij gos. obl. un-t, 2019. S. 455 – 456. — EDN ZBJVFB.

12. *Bazanchuk G. A., Kurakov S. V. E'lementy` problemnogo obucheniya s ispol'zovaniem mezhdisciplinarny`x gumanitarny`x svyazej v tradicionnom kurse texnicheskogo predmeta // Mezhdunarodnoe sotrudnichestvo vuzov gosudarstv – uchastnikov Sodruchestva Nezavisimy`x Gosudarstv. Rol` texnicheskix universitetov v formirovanii edinogo nauchno-texnologicheskogo i obrazovatel'nogo prostranstva SNG: sb. nauch. st. M. : Assocz. texnich. un-tov, 2021. S. 139. — EDN TNMNVC.*

Сведения об авторах

Котельников Павел Николаевич — художник-реставратор высшей категории произведений из металла; ФГБНИУ «ГОСНИИР», заведующий отделом научной реставрации произведений из металла
Российская Федерация, 107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
E-mail: 113metal@gmail.com

Кураков Сергей Витальевич — инженер-исследователь; ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», инженер I кат. Музея
Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1
E-mail: kurakov@bmstu.ru

Самойлов Владимир Борисович — к. т. н.; ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», доцент кафедры «Технологии обработки материалов» (МТ-13)
Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1
E-mail: wladsam@mail.ru

Kotelnikov Pavel N. — artist-restorer of the highest category of metal works; The State Research Institute for Restoration, head of the department of scientific restoration of metal works
1-44, Gastello St., Moscow, 107014, Russian Federation
E-mail: 113metal@gmail.com

Kurakov Sergey V. — Researcher engineer; Bauman Moscow State Technical University, Engineer I cat. of Museum
1-5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation
E-mail: kurakov@bmstu.ru

Samoilov Vladimir B. — Ph.D.; Bauman Moscow State Technical University, associate professor of the Department of Materials Processing Technologies
1-5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation
E-mail: wladsam@mail.ru

Научное издание

**Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение.
Art Heritage. Research. Storage. Conservation.**

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС77-82901

от 14.03.2022 г.

ISSN 2782-5027

Подписано в печать 28.12.2024 г.

Федеральное государственное бюджетное
научно-исследовательское учреждение
«Государственный научно-исследовательский институт реставрации»
107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 1
e-mail: journal@gosniir.ru
Сайт: <http://www.journal-gosniir.ru/>