

УДК 778.64

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-7-9

**Реализация трёхмерной печати разными материалами
в одном технологическом цикле способом фотополимеризации в ванне**

**Implementation of multi-material 3D printing
in a single technological cycle using vat photopolymerization**

И. Н. Аксентьев

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

I. N. Aksentev

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. В статье рассматривается возможность реализации многоматериальной трёхмерной печати способом фотополимеризации в ванне на стандартном LCD-принтере. Предложен ручной метод последовательной замены фотополимерных смол в ходе одного непрерывного технологического процесса. Печать осуществлялась при постоянных параметрах: толщина слоя – 0,04 мм, время экспонирования – 6 секунд. В двух сериях экспериментов реализованы переходы от стандартной смолы к ABS-like и от ABS-like к термостойкой TR-300. Замена производилась вручную после приостановки печати и промывки модели в изопропиловом спирте. Проведён анализ полученных результатов с точки зрения геометрической стабильности, сцепления слоёв и целостности изделия. Показана технологическая реализуемость метода при условии соблюдения ряда требований, включая совместимость смол по спектральной чувствительности и корректную организацию перехода. Сделан вывод о применимости метода в условиях технического прототипирования.

Ключевые слова: трёхмерная печать, фотополимеризация в ванне, смена материала, фотополимерная смола, LCD-принтер, технологический цикл, ABS-like, термостойкая смола TR-300

Abstract. The paper presents an approach to implementing multi-material 3D printing within a single technological cycle using vat photopolymerization. A manual method of sequential resin replacement during printing without interrupting the process was proposed and experimentally tested. Two cases were studied: a transition from standard resin to ABS-like resin, and from ABS-like resin to heat-resistant TR-300. The model was rinsed with isopropyl alcohol between transitions to prevent material contamination. Printing was carried out using uniform parameters: a layer height of 0.04 mm and an exposure time of 6 seconds. The results demonstrate the feasibility of the method under consistent process conditions and confirm the integrity of bonding between different resins. The approach is considered applicable to the development of functional prototypes requiring zones with different mechanical and thermal properties.

Keywords: 3D printing, vat photopolymerization, material switching, photopolymer resin, LCD printer, technological cycle, ABS-like, heat-resistant resin TR-300

Введение

Развитие аддитивных технологий сопровождается всё более широким внедрением трёхмерной печати в инженерную практику. Одной из актуальных задач, особенно в области функционального прототипирования, является создание изделий, совмещающих различные физико-механические свойства в пределах единой геометрии. Применение многоматериальной печати позволяет получить участки модели с различной жёсткостью, ударной вязкостью, термостойкостью и другими характеристиками, оптимизируя конструкцию под условия эксплуатации.

Наиболее доступными с точки зрения широкого применения в лабораторной и производственной среде являются LCD-принтеры, работающие по технологии послойной фотополимеризации. Однако конструктивные особенности таких устройств предусматривают использование единственного типа фотополимера на протяжении всего технологического цикла. Стандартное программное обеспечение и компоновка ванны не предполагают смену материала в ходе построения модели.

В статье [1] рассмотрены подходы к созданию протезов нижних конечностей с переменной жёсткостью методом аддитивного производства, в том числе за счёт реализации мультиматериальной 3D-печати. Описаны примеры использования FDM с двумя экструдерами и технологий PolyJet и MultiJet Fusion для формирования гильз протезов с жёсткими и мягкими сегментами. Особое внимание уделено анатомической адаптации и комфорту пациента за счёт распределения жёсткости, однако технологические параметры процесса печати, режимы постобработки и результаты экспериментальной оценки прочностных характеристик изделий не рассматриваются. В статье [2] представлена обширная классификация технологий аддитивного производства, применяемых

для изготовления электронных устройств, и описан подход к реализации мультиматериальной 3D-печати. Рассматриваются способы получения многослойных структур путём комбинирования различных материалов в рамках одного технологического процесса, включая использование нескольких экструдеров, ванн с фотополимерами и различных чернил. Приводятся примеры реализации структур, состоящих из чередующихся диэлектрических и проводящих слоёв, однако экспериментальные данные по физико-механическим характеристикам полученных изделий и параметры технологического процесса не приводятся.

В данной работе предлагается простой метод последовательной смены фотополимерной смолы вручную в процессе печати, без модификации оборудования и с сохранением геометрической непрерывности изделия. Цель исследования заключается в подтверждении технологической реализуемости многоматериальной печати на LCD-принтере путём последовательной смены фотополимерных смол без прерывания цикла, с сохранением геометрической точности и прочности соединения материалов.

Теория

Процесс трёхмерной печати способом фотополимеризации в ванне предполагает поэтапное формирование модели путём последовательной экспозиции жидкой фотополимерной смолы через маску ЖК-дисплея при воздействии ультрафиолетового излучения. Каждый слой модели полимеризуется на поднимающейся платформе, обеспечивая послойное построение изделия. В базовой реализации технология предполагает использование одного типа смолы на протяжении всего цикла.

Рассматриваемая методика основана на возможности принудительной остановки печати на определённой высоте и замене фотополимера вручную. После замены материал продолжает полимеризоваться в тех же условиях, без изменения положения. Таким образом, обеспечивается последовательное формирование участков модели из разных материалов.

Ключевым условием успешности метода является предотвращение смешивания фотополимеров в переходной зоне. Для этого в ходе экспериментов применялась предварительная промывка нижней части модели в изопропиловом спирте. Такой подход обеспечивает удаление остаточной смолы с поверхности и снижает вероятность загрязнения нового материала. Переход между смолами планировался на участке модели с увеличенной площадью поперечного сечения, что обеспечивает большую площадь контакта и способствует повышению прочности сцепления.

Используемые материалы обладают сопоставимыми условиями отверждения, что позволило сохранить единые параметры печати: высоту слоя 0,04 мм и экспозицию 6 секунд на слой. В качестве материалов выбраны три вида смолы: стандартная фотополимерная смола общего назначения, ABS-like смола и термостойкая смола TR-300. Все материалы совместимы по условиям отверждения и не требуют индивидуальной перенастройки режима печати.

Результаты

Первый эксперимент был направлен на проверку сцепления стандартной и ABS-like смолы. В САПР «Компас-3D» разработана модель цилиндра диаметром 20 мм и высотой 100 мм. Печать велась из стандартной смолы до высоты 50 мм. После достижения указанной высоты печать была приостановлена. Из ванны удален первый материал и добавлен следующий. Печать продолжалась до завершения. Визуальный осмотр модели показал отсутствие дефектов в зоне перехода. Граница материалов различима по цвету, однако геометрически модель осталась непрерывной.

Во втором эксперименте исследовалась возможность перехода от ABS-like смолы к термостойкой TR-300. В качестве тестовой геометрии использовалась деталь технически-производственного назначения, имеющая утолщение в средней части, выбранное как зона перехода. После завершения печати нижней части из ABS-like смолы, модель была промыта изопропиловым спиртом и произведена замена смолы на TR-300. Печать завершалась в штатном режиме. Визуально переход не сопровождался деформациями, геометрия изделия сохранялась.

Нарушений геометрии, расслоений или нарушений структуры в зоне контакта смол не обнаружено. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность последовательной печати разными материалами с сохранением качества изделия.

Выводы и заключение

Цель исследования, заключающаяся в подтверждении технологической реализуемости многоматериальной печати с сохранением точности и прочности, достигнута. Результаты экспериментов показали, что смена фотополимерной смолы в процессе печати возможна без нарушения технологической непрерывности, при условии промывки модели и использования совместимых материалов. Предложенный метод позволяет изготавливать изделия, содержащие участки с различными характеристиками, включая повышенную термостойкость или прочность, без дополнительных сборочных операций.

Перспективами дальнейшей работы являются количественные испытания прочности соединения, разработка рекомендаций по геометрии переходных зон, а также проработка алгоритмов автоматизации процесса смены смолы в рамках одного технологического цикла.

Список источников

1. Обзор применения аддитивных технологий в медицине: перспективы функционально-градиентных полимеров в протезировании нижних конечностей / А. Э. Абдрахманова, А. В. Сотов, А. И. Зайцев, А. А. Попович. DOI: 10.18721/JEST.29405 // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 83–96. EDN OJLYYT.
2. Толочко Н., Ланин В. Л. 3D-печать в электронике. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.124.132 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. № 6 (197). С. 124–133. EDN XXSKLZ.