

УДК 778.64

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-90-92

Сравнение технологий трехмерной печати фотополимерными материалами

Comparison of three-dimensional printing technologies with photopolymer materials

С. А. Хлыстов

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

S. A. Khlystov

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Статья посвящена сравнению технологий SLA, DLP и LCD фотополимерной 3D-печати. Рассмотрены принципы работы, преимущества и ограничения каждой из технологий. На основе сравнения технологий предложены рекомендации по выбору оборудования и оптимизации процесса печати для различных прикладных задач. Результаты могут быть использованы в образовательных целях и при внедрении аддитивных технологий в малом бизнесе.

Ключевые слова: 3D-печать, фотополимеры, SLA, DLP, LCD

Abstract. The article is devoted to the comparison of SLA, DLP and LCD technologies of photopolymer 3D printing. The principles of operation, advantages and limitations of each technology are considered. Based on a comparison of technologies, recommendations are offered on the choice of equipment and optimization of the printing process for various applications. The results can be used for educational purposes and in the implementation of additive technologies in small businesses.

Keywords: 3D printing, photopolymers, SLA, DLP, LCD

Введение

Фотополимерная 3D-печать, появившаяся в 1980-х годах с изобретением стереолитографии (SLA) [1], стала основой для создания высокоточных изделий в медицине, инженерии и дизайне [2]. Современные технологии, такие как DLP и LCD, удешевили процесс, сохранив преимущества фотополимеризации, такие как скорость, гладкость поверхности и минимальные отходы.

Несмотря на схожий принцип отверждения смолы УФ-светом, каждая технология имеет уникальные особенности, влияющие на выбор пользователя. Например, LCD-принтеры стали популярны благодаря низкой стоимости, но уступают SLA в долговечности оборудования. Цель работы — провести сравнительный анализ технологий SLA, DLP и LCD, оценив их ключевые параметры: точность, скорость печати, стоимость оборудования, долговечность компонентов и качество поверхности. На основе этого анализа будут предложены рекомендации по выбору оптимальной технологии для различных прикладных задач.

Теория

Фотополимерная 3D-печать объединяет несколько технологий, основанных на избирательном отверждении жидких смол ультрафиолетовым излучением. Несмотря на общий принцип, методы SLA, DLP и LCD существенно различаются в реализации, что определяет их сильные и слабые стороны.

Стереолитография (SLA) – первая технология, разработанная в 1980-х годах. В её основе лежит использование лазера с длиной волны 405 нм, который последовательно сканирует поверхность фотополимерной смолы, формируя контуры каждого слоя. Точность позиционирования лазера обеспечивается гальванометрическими зеркалами, что позволяет достигать разрешения до 25 мкм. Оборудование SLA-принтеров включает резервуары из кварцевого стекла, минимизирующие рассеивание света, и платформу, которая постепенно погружается в смолу по мере отверждения слоёв. Эта технология идеально подходит для задач, требующих микроточности, таких как создание стоматологических моделей, ювелирных изделий или микрофлюидных чипов. Однако высокая стоимость оборудования и низкая скорость печати, обусловленная пошаговым сканированием, ограничивают её применение в массовом производстве.

Цифровая обработка света (DLP), в отличие от SLA, использует проектор, который проецирует целое изображение слоя на смолу, отверждая его одновременно по всей площади. Это сокращает время печати в 2–5 раз по сравнению с SLA, хотя разрешение снижается из-за пикселизации проектора. Технология DLP получила распространение в прототипировании, архитектурном макетировании и создании художественных объектов, где важна скорость без существенной потери детализации. К недостаткам можно отнести появление ступенчатых артефактов на наклонных поверхностях и ограниченную площадь печати, связанную с разрешением проектора. Тем не менее, DLP остаётся популярной благодаря балансу между скоростью, качеством и стоимостью оборудования.

Маскированная фотополимеризация (LCD) стала доступной альтернативой DLP и SLA за счёт использования ЖК-матрицы в качестве динамической маски. УФ-светодиоды подсвечивают экран, который блокирует свет в областях, не требующих отверждения. Это позволяет формировать слои по качеству, сопоставимым с DLP, но при значительно меньшей стоимости принтеров. LCD-устройства, такие 3D-принтеры широко применяются в образовании, производстве сувениров и печати деталей с умеренными требованиями к точности. Однако ЖК-экраны подвержены быстрому износу из-за постоянного воздействия УФ-излучения (срок службы 1000 часов), а низкая контрастность матрицы может ухудшать чёткость границ.

Таким образом, выбор между SLA, DLP и LCD зависит от приоритетов: максимальная точность, скорость или экономичность. Каждая технология занимает свою нишу, что делает фотополимерную печать гибким инструментом для разнообразных задач.

Результаты

Для наглядного сопоставления технологий SLA, DLP и LCD рассмотрим их основные параметры, влияющие на качество печати, экономическую эффективность и область применения. Сравнение проведено по таким критериям, как точность, скорость, стоимость оборудования, долговечность компонентов и качество поверхности. Результаты представлены в табл. 1, которая позволяет систематизировать различия и сделать обоснованный выбор технологии под конкретные задачи.

Таблица 1

Сравнение технологий фотополимерной 3D-печати

Параметр	SLA	DLP	LCD
Точность	Высокая	Средняя	Средняя
Скорость печати	Низкая (пошаговое сканирование)	Высокая (одновременное отверждение слоя)	Высокая (аналогично DLP)
Стоимость оборудования	Высокая	Средняя	Низкая
Долговечность компонентов	Высокая (кварцевое стекло, лазер 10000 часов)	Средняя (лампа проектора 5000 часов)	Низкая (ЖК-экран 1000 часов, УФ-матрица 40000 часов)
Энергопотребление	Высокое	Среднее	Низкое
Требования к смолам	Специализированные	Стандартные	Бюджетные
Качество поверхности	Максимально гладкая	Хорошее, возможны артефакты	Хорошее, но зависит от матрицы
Области применения	Микроточные изделия (стоматология, ювелирка)	Прототипирование, архитектурные макеты	Образование, сувениры, детали средней точности

Выводы и заключение

Среди методов фотополимерной печати LCD-технология демонстрирует наиболее сбалансированное сочетание экономичности, скорости и качества, что делает её привлекательным выбором для широкого круга пользователей. Рассмотрим подробнее особенности данной технологии.

1. Экономическая эффективность

о LCD-принтеры существенно **дешевле** аналогов, что делает их оптимальным решением для образовательных учреждений, стартапов, малого бизнеса и частных пользователей.

о Использование недорогих расходных материалов снижает себестоимость печати.

2. Оптимальная скорость

о Современные LCD-принтеры с монохромными экранами обеспечивают **высокую скорость печати** (1–3 секунды на слой), приближаясь к показателям более дорогих DLP-принтеров.

о Технология позволяет эффективно печатать как единичные изделия, так и небольшие партии.

3. Достаточное качество для большинства задач

о Разрешение удовлетворяет требованиям большинства прикладных задач.

о Совершенствование ЖК-матриц позволяет минимизировать дефекты печати.

4. Простота использования и обслуживания

о LCD-принтеры отличаются **понятным интерфейсом** и простотой калибровки.

о Замена изнашиваемых компонентов (например, ЖК-экрана) не требует значительных затрат.

Области применения

LCD-печать уже активно используется:

- В **образовании** – благодаря низкой стоимости и простоте освоения.
- В **малом бизнесе** – для производства сувенирной продукции, прототипов и функциональных деталей.
- В **хобби-печати** – как наиболее доступная технология для начинающих.

Перспективы развития

Дальнейшее совершенствование LCD-технологии, включая повышение разрешения экранов и расширение ассортимента смол, открывает новые возможности для её применения в профессиональных областях.

Вывод: LCD-печать – это технология, которая сочетает в себе **доступность, удобство и достаточное качество**, что делает её отличным выбором для тех, кто хочет начать работать с 3D-печатью без значительных инвестиций. Её развитие позволяет прогнозировать дальнейшее расширение сфер использования.

Список источников

1. Новиков С. В., Рамазанов К. Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы : учеб. пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа : Изд-во УГАТУ, 2022. 75 с. ISBN 978-5-4221-1577-8. EDN CYIXHH.
2. Шкрум А. С., Катасонова Г. Р. Тенденции применения аддитивных технологий в различных предметных областях и в медицинской сфере. DOI: 10.25694/URMJ.2020.05.38 // Уральский медицинский журнал. 2020. № 5 (188). С. 216–220. EDN NVQJGY.
3. Анализ факторов, оказывающих влияние на нарушение геометрии изделий в процессе аддитивного построения / А. В. Голунов, Л. Г. Варепю, А. С. Голунова, С. А. Щеглов. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-557-558 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 557–561. EDN CEFSXZ.