

Современное состояние исследований в области конструкций устройств для 3D-печати с использованием фотополимерных композиций (обзор)

Current state of research in the field of 3D printing device designs using photopolymer composites (review)

*Е.С. БОЧКАРЁВ¹, И.С. ТОРУБАРОВ^{1,2}, Ю.М. МКРТЧЯН¹,
Н.В. СИДОРЕНКО¹, А.В. ДРОБОТОВ^{1,2}, М.А. ВАНИЕВ¹*

*E.S. BOCHKARYOV¹, I.S. TORUBAROV^{1,2}, Y.M. MKRTCHYAN¹,
N.V. SIDORENKO¹, A.V. DROBOTOV^{1,2}, M.A. VANIEV¹*

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² ООО «StereoTech», Волгоград, Россия

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² StereoTech LLC, Volgograd, Russia

w_tovn@mail.ru

Аддитивные способы получения полимерных изделий развиваются и внедряются в промышленность с высокой скоростью. При этом возрастают требования, предъявляемые к изделиям, полученным по данным технологиям, что, в свою очередь, приводит к модернизации оборудования и разработке методов и устройств для их реализации. В работе рассмотрены различные конструкции устройств для реализации методов фотополимерной печати и их развитие. Представлены 3D-принтеры для реализации таких технологий фотополимерной печати, как SLA, DLP, SGC, LOM, LCD, PolyJet, CLIP, DLC и CAL, и их особенности. Обобщение информации из наукометрических баз данных позволило провести форсайт в области технологий фотополимеризации и модернизации оборудования для перехода технологий на следующий этап развития объемной аксиальной литографии, дополненной с применением элементов фотоингибирования смолы, преимущественно двухволновой фотополимеризацией.

Ключевые слова: стереолитография, фотополимеризация, 3D-принтер, послойная печать, объемная печать, фотоингибирование, фотоиницирование

Additive methods of producing polymer products are developing and being introduced into industry at a high rate. At the same time, the requirements for products obtained using these technologies are increasing, which, in turn, leads to modernization of equipment and development of methods and devices for their implementation. The paper considers various designs of devices for the realization of photopolymer printing methods and their development. 3D printers for realization of photopolymer printing technologies such as SLA, DLP, SGC, LOM, LCD, PolyJet, CLIP, DLC and CAL and their features are presented. Generalization of information from scientometric databases allowed to carry out foresight in the field of photopolymerization technologies and equipment modernization for technology transition to the next stage of development of volumetric axial lithography, supplemented with the use of photoinhibition elements of resin, mainly dual-wave photopolymerization.

Keywords: Stereolithography, photopolymerization, 3D printer, layer-by-layer printing, volumetric printing, photoinhibition, photoinitiation

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-05-42-48

Введение

Современная промышленность, наряду со стандартными массовыми методами производства изделий, в отдельных областях сумела внедрить аддитивные технологии изготовления как прототипов, так и функциональных изделий. Отметим, что эволюцию для большинства конструкций классического оборудования, применяемого для экструзии, вальцевания и других процессов изготовления изделий, можно считать устоявшейся. Существуют справочники и расчетные рекомендации для различных параметров и отдельных узлов экструдеров, вальцов и смесителей закрытого типа [1]. В случае производства изделий методом стереолитографии конструкция 3D-принтеров претерпевает существенные изменения. Это связано с недостатками, присущими технологии в целом. Наблюдается дисбаланс в экономико-технических характеристиках принтера, что выражается в невысокой производительности оборудования при его высокой стоимости и требованиям к квалификации оператора. Существует ряд обзоров, показывающих эволюцию конструкций 3D-принтеров, работающих по FDM технологии [2–4]. В рамках данной статьи мы рассмотрим уст-

ройства для печати с использованием метода стереолитографии. Для данных устройств имеются и некоторые сложности с технологическими ограничениями используемых фотополимерных композиций, временем печати изделия и сложностью изготовления изделий с дискретными волокнами. В значительной степени исправить данные недостатки возможно при изменении конструкции фотополимерного принтера. С учетом вышесказанного, отметим, что 3D-принтеры занимают, в основном, высокомаржинальные области промышленности с мелкосерийным производством.

Цель данного обзора – оценить достижения в области изменения конструкции устройств для 3D-печати с использованием фотополимерных композиций и определить перспективы развития.

Технология печати SLA

Процесс стереолитографии, базирующийся на явлении фотополимеризации, был запатентован в 1986 году Чарльзом Халлом. Самый первый способ SLA при отверждении использовал лазерный луч для избирательного отверждения светочувствительной жидкости до желаемой формы в последовательных слоях. После завершения слоя платформа внутри ванны опускается на опре-

деленную величину вниз по оси Z и лазером отверждается следующий слой. Данный метод является одним из наиболее точных процессов 3D-печати с превосходным качеством поверхности. В зависимости от расположения лазера конструкция принтера может быть с засветкой снизу или сверху, как показано на рис. 1.

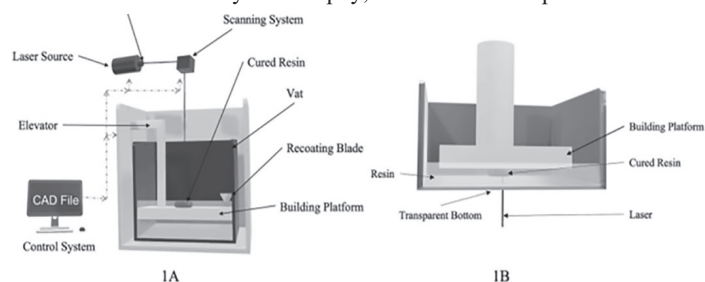


Рис. 1. Схематическое изображение SLA с верхним расположением лазера (1А) и нижним расположением лазера (1В) [5].

Однако авторами некоторых работ были выделены недостатки и ограничивающие факторы, присущие данному методу. Авторы работы [6] указывают на сложность процесса постобработки и окрупчивание изделий с течением времени.

В исследовании [7] в качестве недостатков существующей SLA технологии отмечены:

1. Большой размер оборудования и его высокая стоимость.
2. Срок службы He-Cd лазера 3000 часов и необходимость длительной проходки лазером поверхности светоотверждаемой смолы.
3. Необходимость проектирования опорной конструкции заготовки, чтобы гарантировать адгезию подложки и ручное удаление изделия после печати.

Важным параметром в данной технологии является лазерная плотность, которая определяется следующим образом [8]:

$$E = \frac{\rho}{\nu h}, \left(\frac{J}{mm^2} \right)$$

где E – плотность энергии, ρ – мощность лазера, ν – скорость сканирования, h – расстояние штриховки.

Кроме того, в исследовании [9] авторы оценивают квантовый выход внешней фотолюминесценции (PLQY), который определяется путем деления числа испущенных фотонов (N_{em}) на количество поглощенных фотонов (N_{abs}):

$$PLQY = \frac{\#photons\ emitted}{\#photons\ absorbed} = \frac{N_{em}(\lambda_{ex})}{N_{abs}(\lambda_{ex})}$$

Также в данной работе отмечается одно из важных достоинств SLA технологии с применением в качестве источника излучения лазера. При использовании повышающего преобразования лазерного луча возможно обеспечить выборочное сшивание смолы в объеме (рис. 2). Это позволяет печатать внутри и сквозь детали, ранее напечатанные на 3D-принтере.

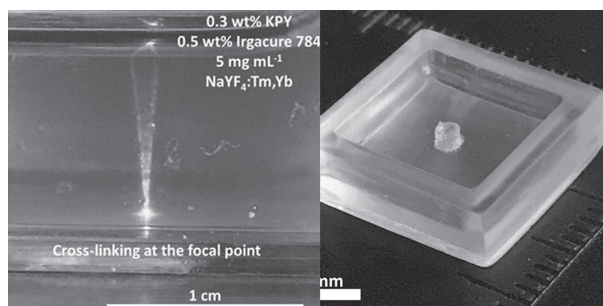


Рис. 2. SLA-печать с использованием в качестве источника света лазера сквозь объем фотополимерной смолы.

Физически пространственное разрешение SLA зависит от размера светового пятна и может быть улучшено за счет применения УФ-лазеров с короткими длинами волн. Однако поскольку схема сканирования «точечно-линейный слой» широко используется, SLA по-прежнему страдает от низкой эффективности печати. Кроме того, дифракционная картинка лазера оказывает значимый эффект на снижение точности печати (рис. 3) [4].

Дальнейшим развитием технологии стала замена УФ-лазера на светодиодную панель. В патенте [10] в качестве УФ-источника ис-

пользована матрица на основе ультрафиолетовых светодиодов для выполнения быстрого формирования широкоформатной экспозиции. Длина волны излучения светодиодной матрицы составляет 385 нм. Ось Z – управление шаговым двигателем для перемещения на заданное расстояние. Схематично устройство принтера представлено на рис. 4.

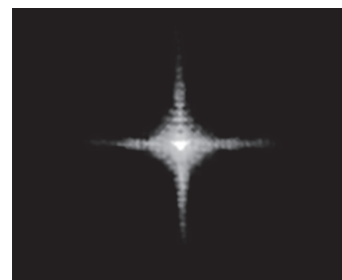


Рис. 3. Дифракционная структура микрооптики, создающая рисунок оптической проекции (масштабная линейка: 100 мкм).

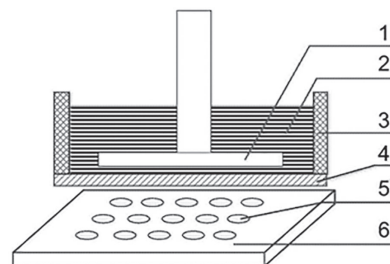


Рис. 4. Схематическое изображение устройства SLA-принтера с использованием панели на основе ультрафиолетовых светодиодов. 1 – рабочая поверхность печати (стол); 2 – фотополимерная композиция; 3 – резервуар для фотополимерной композиции; 4 – экран для проецирования 2D слоев; 5 – УФ-светодиод; 6 – матрица светодиодов.

Несмотря на замену источника УФ-излучения, в работе [11] в качестве недостатков SLA отмечают дороговизну процесса и его трудоемкость, а также ограничение его использования для крупнотоннажного производства.

Однако данный метод широко применяется для печати различных изделий в медицине (рис. 5), ортодонтии и прочих направлениях [12].

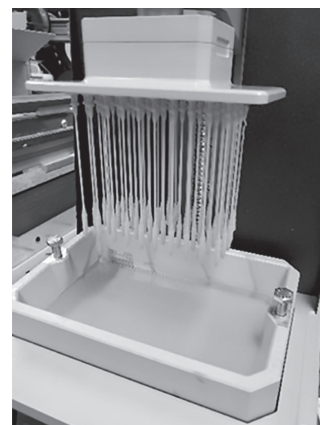


Рис. 5. SLA-печать изделий с использованием УФ-светодиодов.

Технология печати SGC

В 1987 году израильская фирма Cubital впервые заявила о разработке технологии печати Solid Ground Curing (SGC). В процессе SGC используется светочувствительная смола, затвердевающая слоями, как и в процессе SLA. Однако, в отличие от SLA, процесс SGC считается высокопроизводительным производственным процессом. Высокая производительность достигается за счет одновременного отверждения каждого слоя светочувствительной смолы, а не послойного процесса [6].

Каждый слой отверждается путем засветки ультрафиолетовой лампой. При этом все точки слоя затвердевают одновременно и не требуется окончательного отверждения. Процесс состоит из следующих этапов:

- по заданной геометрической модели и желаемой толщине слоя рассчитывается набор поперечных сечений;

- для каждого слоя изготавливается оптическая маска по форме поперечного сечения;
- платформа покрывается жидким фотополимером;
- над слоем полимера помещается маска, соответствующая поперечному сечению изделия, и пластмасса подвергается воздействию ультрафиолетовой лампы;
- удаление оставшейся жидкости;
- заполнение пустот жидким воском, после его застывания слой стачивается до необходимой толщины шлифовальным диском;
- изделие покрывается слоем жидкого полимера, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено готовое изделие;
- застывший воск выплавляется и удаляется из изделия.

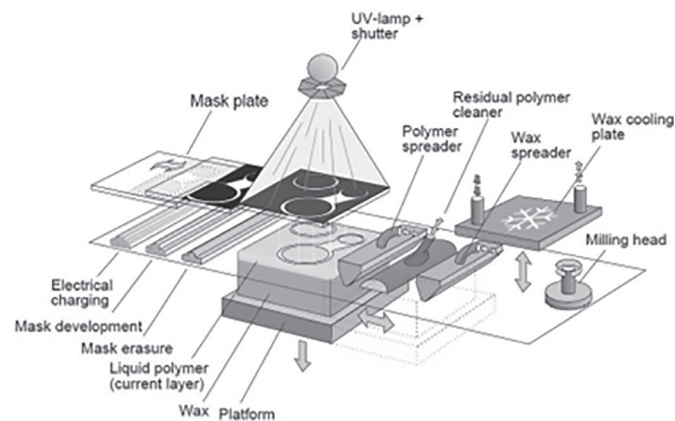


Рис. 6. Схематическое изображение 3D-печати по технологии SGC.

Сечение каждого слоя среза рассчитывается на основе геометрической модели детали и желаемой толщины слоя. Оптическая маска создается в соответствии с каждым поперечным сечением. После выравнивания платформа покрывается тонким слоем жидкого фотополимера. Маска, соответствующая текущему слою, располагается на поверхности жидкой смолы, и смола подвергается воздействию мощной УФ-лампы. Остатки жидкости удаляются с заготовки аэродинамическим скребком. По заготовке распределяют слой расплавленного воска для заполнения пустот. Затем воск затвердевает при прикладывании к нему холодной пластины. Поверхность слоя подравнивается до нужной толщины фрезерным диском. Текущая заготовка покрывается тонким слоем жидкого полимера, и шаги с 4 по 7 повторяются для каждого последующего верхнего слоя, пока не будет обработан самый верхний слой. Воск расплавляется после завершения обработки детали.

Технология печати LOM

Метод ламинирования LOM был разработан в 1980-х годах корпорацией Helisys, получен патент в 1987 году и коммерциализирован в 1991 году для производства 3D-объектов из листов полимера, композитных препрегов (предварительно пропитанных волоконных заготовок), металла, керамических лент или бумаги. Процесс, сочетающий экструзию керамики и фотополимеризацию, был разработан Faes et al. в KU Leuven (Бельгия) при попытке объединить соответствующие преимущества каждой технологии. Была составлена суспензия ZrO_2 , отверждаемая УФ-излучением, состоящая из 30 об.% порошка 3Y-TZP в коммерческой фотополимерной смоле [13]. Схематическое представление технологии печати LOM показано на рис. 7.

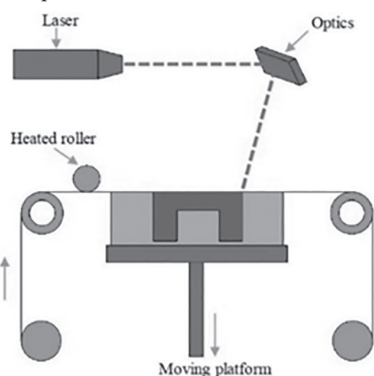


Рис. 7. Схематическое изображение LOM-печати [11].

Авторами [3] отмечены основные недостатки технологии LOM-печати. Во-первых, требуется постобработка изделий, плохое качество поверхности и низкая точность напечатанных изделий. Во-вторых, для данной технологии имеются серьезные ограничения по материалам. Однако следует отметить, что данная технология может быть перспективна при изготовлении армированных изделий.

Технология печати DLP

Основное отличие данной технологии от SLA – источник света. В DLP используется более традиционный источник света, такой как дуговая лампа, которая засвечивает всю поверхность ванны фотополимерной смолы за один проход, что обычно делает DLP производительнее, чем SL. Так же, как и SL, DLP применяют для производства высокоточных деталей с отличным разрешением, но его сходство с SLA также включает в себя те же требования к подделкам и постотверждению. Внешний вид устройства, представленный в патенте [14], показан на рис. 8.

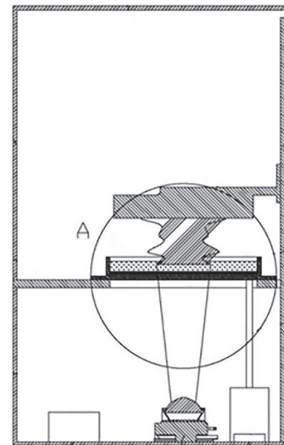


Рис. 8. Схематическое изображение устройства DLP-принтера.

Фотополимеризация в ванне – это процесс, основанный на литографии, определенный стандартом ISO/ASTM 52900:2015(E) как «процесс аддитивного производства, при котором жидкий фотополимер в ванне избирательно отверждается посредством фотополимеризации» [15, 16].

Конструкция принтера также претерпевала изменения. На рис. 9 представлена принципиальная схема портативного DLP-принтера в развернутом состоянии, описанная в патенте [17].

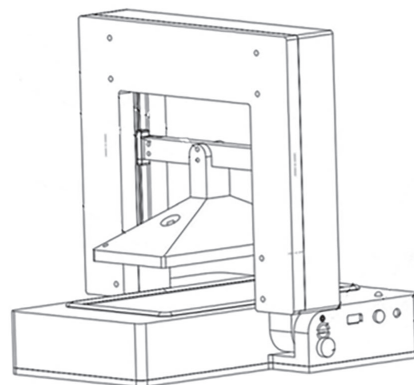


Рис. 9. Схематическое изображение портативного DLP-принтера.

Для получения высокой прецизионности и низкой стоимости устройств использовалась технология цифровых микрозеркальных элементов (Digital Micromirror Device, DMD) для управления отражением света. В патенте продемонстрировано устройство, полученное с использованием DMD чипа. В варианте реализации полезной модели расстояние установки этого источника света и конденсорной линзы от передней панели, фокусирующее свет на передней панели, рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить минимальный нагрев панели. Если переднее и заднее фокусные расстояния соответственно равны f и f' , источник света имеет размер A , а изображение – размер d , то линейные размеры 3D-принтера определяются следующими условиями: $f'/L_2 + f/L_1 = 1$; $L_1/L_2 = A/d_0$ [18].

На примере конкретных вариантов рассмотрим основные применения DLP/SLA принтеров. Авторами работы [19] оценивалась возможность изготовления звукопоглотителей из микроперфорированных панелей с использованием технологии 3D-печати DLP. Эта работа демонстрирует возможности технологии DLP для изготовления MPP и исследует возможности ее проектирования за счет использования разного времени выдержки в производственном процессе для достижения разных размеров отверстий. Полученные результаты в зависимости от времени засветки показаны на рис. 10.

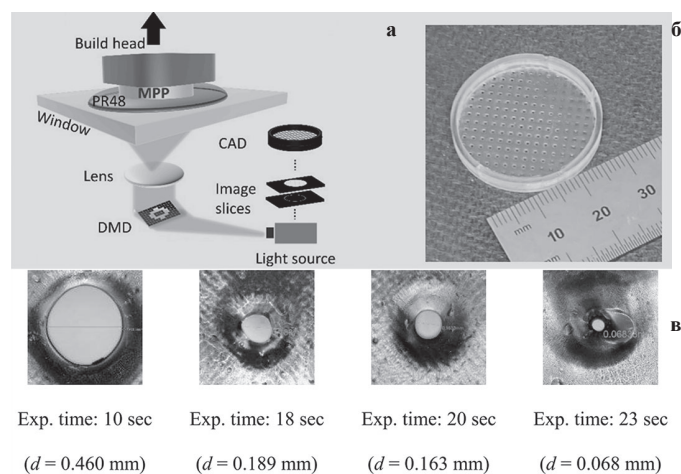


Рис. 10. Изготовление образцов с использованием технологии DLP 3D-печати (а), детальный вид печатного изделия (б), полученного по изображению конструкции; размер отверстия от времени засветки (в).

Исследование фотоотверждаемых порошков на основе энергетических смол, изготовленных методом 3D-печати по DLP технологии, описано в работе [20]. Показана возможность использования указанной технологии в данном направлении и ее перспективность. Технология DLP была исследована для ортодонтических нужд в работе [21]. Также в работах [22, 23] данная технология применялась для нанокompозитных керамических каркасов с использованием кристаллов с низким показателем преломления. При этом, в отличие от SLA печати лазером, данная технология позволяет разом засвечивать большую область, что видно на примере печати крыльчатки рис. 11.

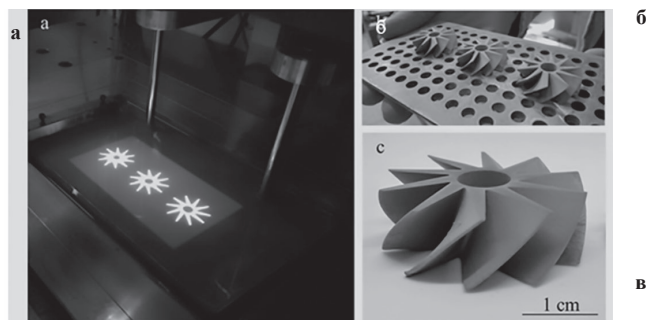


Рис. 11. Изображения процесса DLP-SLA во время печати изделия, по геометрии напоминающего пропеллер (а), необработанных тел на строительной платформе после очистки (б) и пропеллеров зеленый корпус (в).

В работе [24] показано влияние вязкости смол на возможные ограничения печати. Известно, что при малых значениях вязкости смолы снижается сложность печати, и авторами отмечено, что высокая точность достигается при вязкости до 12 Па·с. Важно отметить, что технология DLP-печати позволяет печатать гибкие изделия из модифицированного жидкого изопренового каучука, что показано в работе [25].

Для оценки степени конверсии (α) двойных связей акрилата можно использовать уравнение [26]:

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{max}}$$

где ΔH_t — энтальпия реакции в момент времени t , полученная путем интегрирования площади под кривой ДСК, а ΔH_{max} — конечное значение энтальпии после полного процесса УФ-отверждения.

Скорость фотополимеризации (R_p) в той же работе определяли с использованием формулы:

$$R_p = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dH/dt}{\Delta H_0^{theor}}$$

Аналогично SLA-печати, конструкция принтера DLP позволяет размещать проектор не только под ванной, но и сверху (рис. 12). Данный вариант был представлен в патентах [27, 28]. Технология отбрасывания теней DLP может гарантировать, что формованное изделие может достичь эффективного перехода между слоями, поверхность не вызывает ощущения, что наслаивание непрерывное, а скорость формирования очень высокая. При этом данная технология подходит для печати с использованием нескольких фотополимеров, как показано в патентах для устройств [29, 30]. Проблема при использовании нескольких материалов в SL может заключаться в управлении загрязнением сырья при смене различных материалов, используемых в процессе производства.

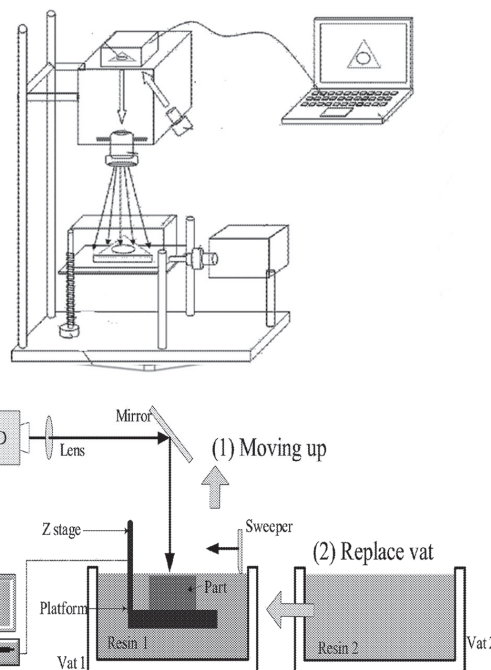


Рис. 12. Схематическое изображение DLP принтеров с верхним расположением проектора.

В качестве недостатка, особенно при SLA и DLP печати, отмечают, что слив и очистка имеющейся смолы перед заменой на другую ванну для смолы может занять много времени и привести к значительным потерям материала.

В патенте [31] установлены три фактора, потенциально влияющие на силу отрыва изделия от поверхности пленки: (1) время воздействия; (2) область изображения; и (3) форма изображения. Также важно отметить, что при наличии пленки с покрытием в ванне, сила отделения детали от поверхности может быть значительно большей и достигать 27,8 Н (для площади изображения 625 мм с экспозицией в 1 секунду). Сила разделения неотвержденной смолы значительно ниже.

Технология печати LCD

Изобретение [32] раскрывает способ быстрого формования смолы, основанный на принципе избирательного регионального пропускания света с использованием LCD дисплея (жидкокристаллический дисплей), относящийся к области техники быстрого формования. Способ характеризуется тем, что включает следующие этапы: размещение резервуара для хранения жидкой смолы над LCD-экраном, послойное экспонирование с использованием метода контактного экспонирования и размещение линзы Френеля между ЖК-экраном и источником света. При этом толщина каждого слоя во время отверждения составляет от 200 до 400 микрон, а именно после того, как слой подвергается воздействию и отверждению, опорная пластина формовочной детали соответственно перемещается вверх на 200–400 микрон под контролем системы перемещения по оси Z, время отверждения

нанесенного слоя составляет от 1 до 8 секунд. В качестве источника света используют мощный светодиод. В соответствии с этим методом точность формования высокая, стоимость низкая, а время отверждения – малое. Схематично данное устройство изображено на рис. 13.

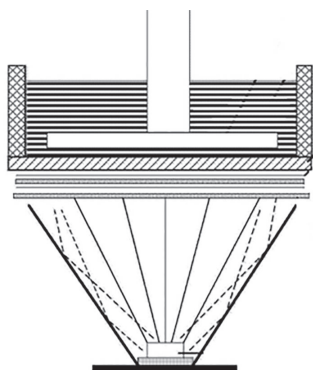


Рис. 13. Схематическое изображение конструкции принтера с LCD-экраном.

Технология LCD-печати для биокерамики с тройными периодическими минимальными поверхностными решетками высокого разрешения показана в [33].

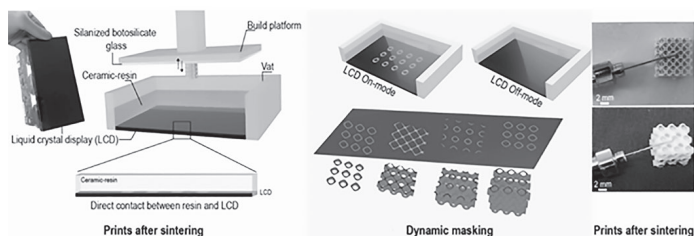


Рис. 14. Принципиальная схема LCD-печати биокерамики.

Данный принтер с простой конструкцией включает одну подвижную часть (платформа печати) и дисплей высокого разрешения под ванной, который создает маску изображения и избирательно облучает поверхность слоя смолы.

Комбинированная LCD-печать с использованием маски подходит для производства биоимпедансных чипов, как показано в [34]. На рис. 15 представлен датчик электрофизиологических измерений, изготовленный по данной технологии.

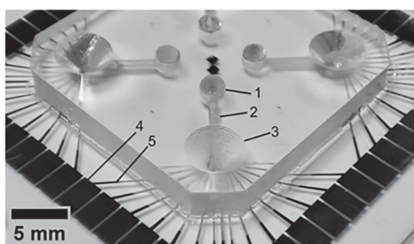


Рис. 15. Конечное устройство, изготовленное с использованием мультитехнологического подхода и предназначенное для электрофизиологических измерений, с четырьмя входными портами с каналами и выходными портами. 1 – выходной порт; 2 – измерительный канал; 3 – входной порт; 4 – электрод; 5 – микроэлектрод входного порта.

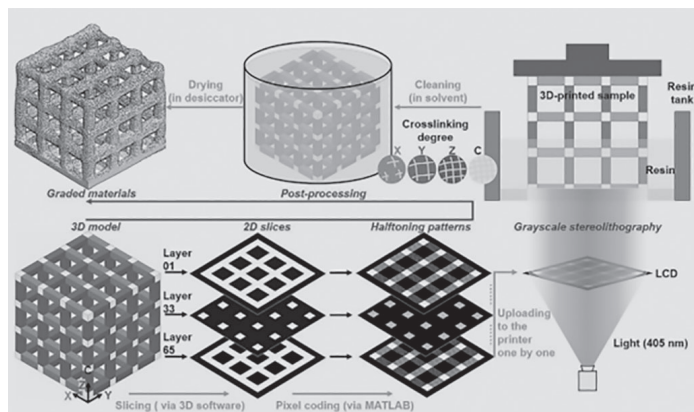


Рис. 16. 3D-печать с полутонами в оттенках серого.

В этом процессе используется LCD-принтер размером с настольный компьютер, что исключает трудоемкое выравнивание и крепление после завершения процесса печати.

Развитием ранее перечисленных исследований стала работа [35], основанная на методах сглаживания и алгоритмах обработки цифровых изображений полутоновой обработкой для создания универсальных файлов для печати, чтобы имитировать уровни шкалы серого. При таком подходе принтер можно использовать для контроля дозы облучения и степени фотополимеризации в каждом печатном слое.

Подготовка бинарных шаблонов для печати: 3D-модель нарезается на фрагменты, и алгоритмы пиксельного кодирования используются для преобразования 2D-фрагментов в двоичные шаблоны, пригодные для прямой печати, состоящие из черно-белых пикселей, имитирующих уровни оттенков серого.

Технология печати PolyJet

Технология PolyJet была изобретена израильской компанией Objet в 2000 г. В 2012 их купили Stratasys. Суть технологии: фотополимер маленькими дозами выстреливается из тонких сопел, как при струйной печати, и сразу полимеризуется на поверхности изготовляемого девайса под воздействием УФ-излучения. Патенты на устройство описаны в [36].

PolyJet использует фотополимеры с большей вязкостью, чем при SLA. В свою очередь, это позволяет использовать и более низкие температуры 30–60°C, при этом композиция имеет вязкость при первой температуре примерно 50–500 сП, и вязкость при второй температуре ниже 20 сП [37, 38].

Системы струйных принтеров, такие как система Objet PolyJet, распыляют фотополимерные материалы на модельный лоток ультратонкими слоями (от 16 до 30 мкм), пока деталь не будет завершена. Каждый слой фотополимера после нанесения струй отверждается УФ-светом, в результате чего получают полностью отвержденные модели, с которыми можно обращаться и использовать немедленно, без последующего отверждения. Гелеобразный опорный материал, предназначенный для поддержки изделий сложной формы, удаляется вручную и струей воды. Он также подходит для эластомеров.

Эти трехмерные 3D-принтеры, основанные на технологии Poly Jet Matrix, могут создавать сложные внутренние структуры из цифровых материалов. OBJET Connex обрабатывает материалы для струйных моделей с помощью специальных сопел для микроструйной печати (рис. 17). Такой процесс может иметь ограничения по выбору основных материалов, поскольку для распыления жидкости может потребоваться определенная её вязкость и температура отверждения [39].

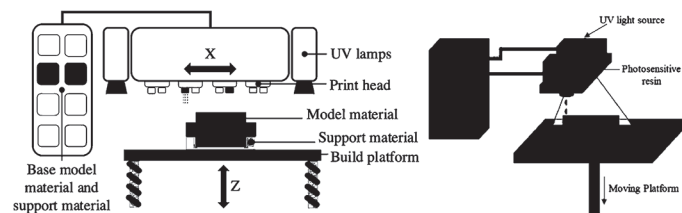


Рис. 17. Схематическое изображение системы PolyJet [40].

Методика измерения показала, что точность PolyJet превосходит точность SLA или DLP [3]. Улучшения в скорости печати, разрешении и масштабируемости ускорят внедрение аддитивного производства в области применения имплантатов. Будущие достижения в области регенеративной медицины, персонализированного здравоохранения и улучшения результатов лечения пациентов значительно выиграют от использования аддитивного производства.

Компьютерная томография с использованием модифицированной технологии аддитивного производства PolyJet, где один материал может имитировать диапазон ослабления излучения мягкими тканями человека [41].

Обнаруженные различия по некоторым параметрам могут привести к внесению корректирующих факторов при дальнейшей разработке вязкоупругой модели, учитывающей не только характеристики фотополимерного материала, но и особенности производства PolyJet [42, 43].

Технологии печати CLIP и DLC с использованием фотоингибиторов

Дальнейшее развитие SLA, DLP и LCD технологий базировалось на снижении времени печати и увеличении прецизионности за счет снижения шероховатости. Новым способом печати стала CLIP технология, описанная в изобретении [44] и представленная на рис. 18.

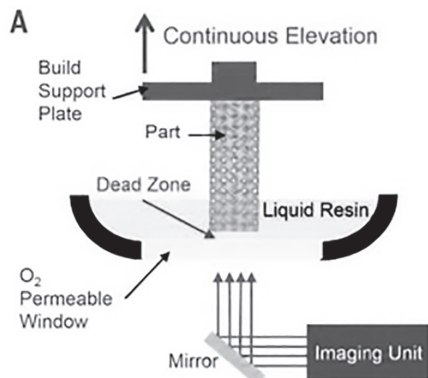


Рис. 18. Схематическое изображение CLIP технологии печати.

Технология базируется на использовании пропускающих кислород материалов, например, в вышеупомянутом изобретении используют пленку из аморфного тефлона марки AF 2400. Толщину печати регулируют расстоянием между поверхностью печати и областью диффузии кислорода, называемой «dead zone» (рис. 18). Это позволяет осуществлять непрерывное проецирование, увеличивая время и точность печати. Кроме того, система может дополнительно включать нагревательный элемент для нагрева смолы, содержащейся в резервуаре для смолы, в целях увеличения диффузии кислорода.

Другим направлением стало изобретение, описанное в [45]. В данной технологии используют двухволновую фотополимеризацию. Уникальным аспектом системы является использование многоцветной системы для достижения объемного рисунка путем фотохимической генерации веществ, инициирующих и ингибирующих полимеризацию при разных длинах волн света (рис. 19).

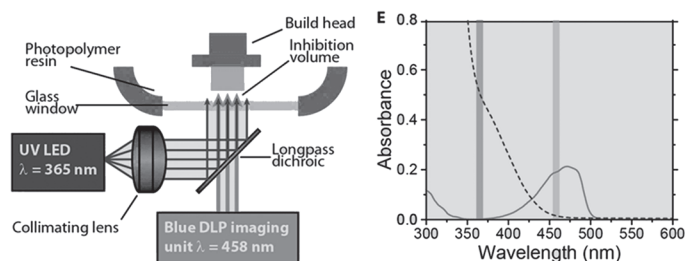


Рис. 19. Схематическое изображение DLC технологии.

Независимый контроль инициирования и ингибирования требует, чтобы фотоинициирующие и фотоингибирующие виды имели дополняющие УФ-спектры поглощения. Как показано на рис. 19, ингибитор демонстрирует очень слабое поглощение в синей области спектра и умеренное поглощение в ближнем ультрафиолете, дополняя спектр поглощения фотоинициатора, который поглощает синий свет ($I_{\max} = 470 \text{ nm}$), но плохо поглощает ближний УФ. Это минимальное перекрытие спектров поглощения в области спектра от ближнего УФ до синего позволяет избирательно инициировать полимеризацию синим светом и ингибировать УФ-светом.

Технологии печати CAL

Очевидно, что SLA/DLP/SL методы добились успехов в конструкции принтеров. Однако для практического применения этих методов существуют три основные проблемы:

1. Пространственное разрешение SLA/DLP/SL физически ограничено размером пятна и толщиной слоя.
2. Требуется последующее удаление связующих и спекание деталей из отвержденного стекла, что приводит к нежелательной объемной усадке и отклонению от заданной формы.
3. Детали печатаются точно или послойно, что сопровождается недостаточной эффективностью печати и ухудшением механических / оптических характеристик.

Что касается уменьшения дефектов при печати, недавно разрабатывали метод компьютерной аксиальной литографии (CAL) [46–49] для 3D-печати (рис. 20), основанной на последовательном освещении под разными углами.

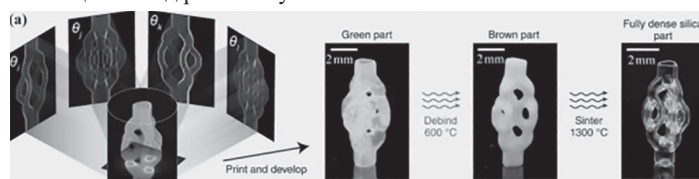


Рис. 20. Схематическое изображение CAL метода печати.

Как ожидается, эта передовая технология откроет двери для объемного аддитивного производства целостной микро-механики, микрофлюидики и микрооптики произвольной формы. В данной технологии используется сложная математика, которая с применением преобразования Радона раскладывает световой спектр на синограммы. Далее с использованием фильтров Рама-Лака из полученных синограмм генерируется накопленное трехмерное распределение интенсивности, так что за одну операцию с одним этапом разработки генерируется трехмерная часть произвольной заданной пользователем геометрии. По данной технологии значительно увеличивается время печати, однако несколько снижается точность печати.

Заключение

Можно отметить значительные изменения в совершенствовании устройств стереолитографии, которые обусловлены, в первую очередь, необходимостью решения возникающих проблем по скорости печати, точности печати и получению высоких механических свойств. Отметим, что при появлении нового метода печати от SLA/DLP/LSD к CLIP/DLS и CAL технологиям несколько усложняется математика процесса и составы фотоотверждаемых смол, а на начальных этапах может немного снижаться детализация.

Проведя форсайт промышленности и производителей аддитивного оборудования для стереолитографии в данном исследовании, авторы данной работы сделали следующее предположение: наиболее перспективным направлением для данной технологии в области конструкции оборудования в ближайшее время будет разработка технологии объемной аксиальной литографии, дополненной применением элементов фотоингибирования смолы, преимущественно двухволновой фотополимеризацией, описанной в методе DLC.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZUS-2023-0007 на основании Соглашения № 075-03-2024-126 от 17.01.2024 с изменениями).

Литература

1. Калинин Э.Л., Калинин Е.И., Саковцева М.Б. Оборудование для литья пластмасс под давлением. Расчет и конструирование. М.: Машиностроение, 1985. 256 С.
2. Lakkala P. et al. Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review // International journal of pharmaceuticals: X. 2023. Т. 5. С. 100159. DOI: 10.1016/j.ijpx.2023.100159.
3. Mobarak M.H. et al. Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication – a review // Applied Surface Science Advances. 2023. Т. 18. С. 100462. DOI:10.1016/j.apsadv.2023.100462.
4. Luo H. et al. Additive, subtractive and formative manufacturing of glass-based functional micro/nanostructures: a comprehensive review // Materials & Design. 2023. С. 112285. DOI:10.1016/j.matdes.2023.112285.
5. Lakkala P. et al. Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review // International journal of pharmaceuticals: X. 2023. Т. 5. С. 10015. DOI: 10.1016/j.ijpx.2023.100159.
6. Milton Dale Meisner, Robin Wynne Nack Meisner. Three-dimensional modelling and/or manufacturing apparatus, and related processes US10137636B2, B29C 64 / 38, B29C 47 / 00, B29C 47 / 0045 2018. P. 30.
7. Wu Jie. High-precision laser photocuring 3D (three dimensional) printer CN103522546. B29C 67/00 2013. P. 9.

8. Atabak Ghanizadeh Tabriz, Hannah Kuofie, James Scoble, Sam Boulton, Dennis Douroumis. Laser Sintering for printing pharmaceutical dosage forms // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023. C. 104699. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104699>.
9. Zhakeyev A. et al. Upconversion 3D printing enables single-immersion multi-material stereolithography // *Applied Materials Today*. 2023. T. 32. – C. 101854. DOI: 10.1016/j.apmt.2023.101854.
10. Chen Jimin, Huang Kuan, Huang Chao. A kind of large format LED dot matrix panel exposure quick molding method CN103707510B B29C 67/00 2013. P. 6.
11. Mobarak M. H. et al. Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication – a review // *Applied Surface Science Advances*. 2023. T. 18. C. 100462. DOI: 10.1016/j.apsadv.2023.100462.
12. Gallup N. et al. Parametric nasopharyngeal swab for sampling COVID-19 and other respiratory viruses: Open source design, SLA 3-D printing and UV curing system // *Hardware X*. 2020. T. 8. C. 100135. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.100135.
13. Zhou Y. et al. Stimulate hydropower output of mega cascade reservoirs using an improved Kidney Algorithm // *Journal of cleaner production*. 2020. T. 244. C. 118613. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118613.
14. Li Houmin, Xu Beibei, Wang Yikun, Liu Zhenliang, Zhu Kaiqiang, Fan Yiyang. Photocuring 3D printer and 3D printing method CN107428076 B29C 64/124, B29C 64/20, B33Y 10/00, B33Y 30/00. 2020. P. 19.
15. ISO/ASTM Standard 52900:2015(E), Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA; 2015.
16. Mott M., Evans J. R. G. Zirconia/alumina functionally graded material mae by ceramic ink jet printing // *Materials Science and Engineering: A*. 1999. T. 271. N. 1/2. C. 344–352. DOI: 10.1111/J.1151-2916.1999.TB01982.
17. Guo Wenhua, Ma Yaojun, He Chen, Dragon King Qiang, Lu Bingheng. A kind of control system based on portable DLP printer and visible photopolymer resin Method of printing CN 110271187A, B29C 64/124, B29C 64/393, B33Y 30/00, B33Y 50/02. 2019. P. 9.
18. Hou Feng. Photo-curing 3D (Three Dimensional) printer and imaging system there of CN203697483U, B29C 67/00 2014. P.17.
19. Carbajo J., Nam S. H., Fang N. X. Fabrication of Micro-Perforated Panel (MPP) sound absorbers using Digital Light Processing (DLP) 3D printing technology // *Applied Acoustics*. 2024. T. 216. C. 109788. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109788.
20. Li M. et al. Study of photocurable energetic resin based propellants fabricated by 3D printing // *Materials & Design*. 2021. T. 207. C. 109891. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109891.
21. Barone S. et al. Development of a DLP 3D printer for orthodontic applications // *Procedia Manufacturing*. 2019. T. 38. C. 1017–1025. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.187.
22. Xue R. et al. DLP printing of BT/HA nanocomposite ceramic scaffolds using low refractive index BT crystals // *Journal of Materiomics*. 2023. DOI: 10.1016/j.jmat.2023.11.004.
23. Komissarenko D. et al. DLP 3D printing of high strength semi-transparent zirconia ceramics with relatively low-loaded UV-curable formulations // *Ceramics International*. 2023. T. 49. N. 12. C. 21008–21016. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.03.236.
24. Fernandes J. G. et al. Study of mixing process of low temperature co-fired ceramics photocurable suspension for digital light processing stereolithography // *International*. 2021. T. 47. N. 11. C. 15931–15938. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.167.
25. Strohmeier L., Frommwald H., Schlögl S. Digital light processing 3D printing of modified liquid isoprene rubber using thiol-click chemistry // *RSC advances*. 2020. T. 10. N. 40. C. 23607–23614. DOI: 10.1039/D0RA04186F.
26. Mendes-Felipe C. et al. Photocurable magnetic materials with tailored functional properties // *Composites Part C: Open Access*. 2021. T. 5. C. 100143. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100143.
27. Wang Jian, Xigu Tianbo. Light-curing three-dimensional printer based on digital light processing (DLP) projection CN103302860A B29C 67/00 2013. P.6.
28. Kim H.C. et al. Slice overlap-detection algorithm for process planning in multiple-material stereolithography // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. T. 46. C. 1161–1170. DOI: 10.1007/s00170-009-2181-x.
29. Wicker, R., Medina F, and Elkins, C (2009), Multi material stereolithography, U.S. Pat. No. 7,556,490; Choi, J W. MacDonald, E. Wicker, R (2010), Multi-material microstereolithography, Int. J. Adv. Manuf. Technol, Vol. 49, pp. 40 543–551. DOI:10.1080/17452759.2012.721119.
30. Han L., Suri S, Schmidt C.E. and Chen S. Proceedings of Annual Solid Freeform Fabrication. Symposium. Austin. Texas. (2010). Fabrication of three-dimensional scaffolds for heterogeneous tissue engineering // *Biomed Microdevices*. N. 12. PP. 721–725. DOI: 10.1007/s10544-010-9425-2.
31. Yong Chen, Chi Zhou. Digital mask-image-projection-based additive manufacturing that applies shearing force to detach eachadded layer US9120270B2 B29C 47/04, B29C 67/00 2013. P. 38.
32. Chen Jimin, Huang Kuan, Fang Haobo. Quick resin forming method based on LCD (liquid crystal display) selective regional light transmission principle CN103722745, B29C 67/00 2013. P. 6.
33. Iman Roohan, Ali Entezari, Hala Zreiqat. Liquid crystal display technique (LCD) for high resolution 3D printing of triply periodic minimal surface lattices bioceramics // *Additive Manufacturing*. 2023. V. 74. P. 103720. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103720.
34. Julia Linert and et. Combined masked LCD-printing and microfabrication for bioimpedance-chips // *Micro and Nano Engineering*. 2022. V.16. P. 100159. DOI: 10.1016/j.mne.2022.100159.
35. Guanghai Fei and et. Digital halftoning for printer-independent stereolithography of functionally graded materials // *Combined mask-based LCD printing and microfabrication of bioimpedance chips*. DOI: 10.1016/j.mne.2022.100159.
36. Nicholas Merz. Inkjet printer for printing on a three-dimensional object and related apparatus and method US20130342592A1 B4.3/00 2012. P. 16.
37. Eduardo Napadensky. Compositions and methods for use in three dimensional model printing US718335B2 C08G 75/04, CSK 5/37, C08K 3/26, CSK 5/04. 2000. P. 22.
38. Benjamin J Sun, Dan Ammon. Three-dimensional fabricating material systems and methods for producing layered dental products US10299896B2 A61K 6/08. A61C 13/00. 2019. P. 25.
39. Khalil. S., Nam. J, Sun W. Multi-nozzle deposition for construction of 3D iopolymer tissue scaffolds // *Rapid Prototyping Journal*. 2005. Vol. 11 (1). PP. 9–17. DOI: 10.1108/13552540510573347.
40. Xingjian Weia, Na Zou, Li Zeng, Zhijian Pei. PolyJet 3D printing: Predicting color by multilayer perceptron neural network // *Annals of 3D Printed Medicine*. 2022. V. 5. P.100049. DOI: 10.1016/j.stlm.2022.100049.
41. Sepideh Hatamikia and et. Additively manufactured test phantoms for mimicking soft tissue radiation attenuation in CBCT using Polyjet technology // *Zeitschrift für Medizinische Physik*. 2023. V. 33. P. 168–181. DOI: 10.1016/j.zemedi.2022.05.002.
42. P. Gaya, D. Blancoa, F. Pelayoa, A. Noriegaa, P. Fernández. Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts // *Procedia Engineering*. 2015. V. 132. P. 70–77. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.481.
43. Roman Vdovin, Tatiana Tomilina, Vitaly Smelov, Maria Laktionova. Implementation of the additive PolyJet technology to the development and fabricating the samples of the acoustic metamaterials // *Procedia Engineering*. 2017. V. 176. P. 595–599. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.302.
44. Karl Willis, Eric Jamesson Wilhelm, Pierre Pascal Anatole Lin, Arian Aziz Aghababae, Qiang Zheng. 3D print adhesion reduction during cure process/ Pat US S9782934B2 B29C 67 / 00, B29K 105 / 00. 2017. P.13.
45. D. Beer and et. Rapid, continuous additive manufacturing by volumetric polymerization inhibition patterning. // *Science advances*. 2019. V. 5(1). P. 8723. DOI: 10.1126/sciadv.aau8723.
46. Hong Luo and et. Additive, subtractive and formative manufacturing of glass-based functional micro/nanostructures: A comprehensive review // *Materials & Design*. 2023. V. 233. P. 112285. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112285.
47. Kelly B.E. and et. Computed Axial Lithography (CAL): Toward Single Step 3D Printing of Arbitrary Geometries // *Computer Science, Engineering*. 2017. P. 11. DOI: 10.48550/arXiv.1705.05893.
48. Kelly R.B., Panas M.S., Spadaccini C.H., Indrasen B.T. System and method for computed axial lithography (CAL) for 3D additive manufacturing. US 10647061B2. B29C 64/30, B29C 64/393. 2020. P.12.
49. Loterie D. et al. Volumetric 3D printing of elastomers by tomographic back-projections // *Engineering, Materials Science*. 2018. P.12. DOI: 10.13140/RG.2.2.20027.46889.