

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

И. К. Луцкая, Т. А. Глыбовская, Н. В. Радюкевич

*Институт повышения квалификации и переподготовки
кадров здравоохранения учреждения образования «Белорусский
государственный медицинский университет»,
г. Минск, Беларусь*

Цифровые технологии упрощают рабочий процесс практической медицины, минимизируют риск ошибок и осложнений, сокращают трудозатраты, в частности, благодаря тому, что 3D-принтеры производят большое разнообразие требуемых образцов с минимальной погрешностью и позволяют снизить психологическую нагрузку на пациента. Аддитивные методы могут применяться в стоматологии для изготовления стереолитографических образцов на основе компьютерного моделирования для изготовления шаблонов имплантатов, ортопедических конструкций, учебных моделей. Наиболее продуктивным использование цифровых технологий становится для пациентов вследствие снижения инвазивности вмешательств, а также сокращения этапов и длительности работы.

Введение. Становление и развитие аддитивных технологий относят к началу 1980-х гг. как методы производства деталей, основанные на послойном изготовлении изделий в виде трехмерной модели и непосредственного получения готовых функциональных образцов, которые не требуют механической постобработки. Широкое применение получили фаббер-технологии – современные методы производства, основанные на поэтапном формировании изделия путем добавления материала на платформу или заготовку. Технологии аддитивного производства совершили значительный прогресс в развитии благодаря быстрому совершенствованию электронной вычислительной техники и программного обеспечения процессов. Используются различные методы 3D-печати, главным образом стереолитография (SLA), техника облучения через маску (DLP), Polyjet-техника и лазерные технологии (SLS, SLM) [1]. В технике лазерной стереолитографии объект формируется послойно из специального

жидкого фотополимера, затвердевающего под действием лазерного излучения. Существует вариация данной технологии – SLA-DLP, в которой вместо лазера используется DLP-проектор (в этом случае слой формируется сразу целиком, что позволяет ускорить процесс печати). При селективном лазерном спекании (SLS) объект формируется из порошкового материала путем его плавления под действием лазерного излучения. Электронно-лучевая плавка (SLD/DMLS) – способ, когда объект формируется путем плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме. 3D-печать аналогична технологии SLS.

Считается, что наиболее заинтересованные отрасли в применении аддитивных технологий (объемной печати) – это авиакосмическая, автомобиле- и машиностроение, медицина, в частности, стоматология, то есть те области, в которых существует потребность изготовления высокоточных изделий и их прототипов в кратчайшие сроки. Современная медицина существенно обогатилась новыми методами, включающими компьютерные, цифровые, аддитивные, 3D-технологии, CAD/CAM-системы [2]. Рентгенологические исследования служат для построения 3D-моделей с последующим изготовлением объектов аддитивным способом. (Привычный термин «3D-печать» нередко применяется как синоним аддитивного изготовления деталей, образцов). В мировой практике для стоматологических целей аддитивные технологии применяются при изготовлении ортопедических конструкций, хирургических шаблонов, лицевых имплантатов. Перспективным направлением считается моделирование индивидуальных зубных протезов (коронки, мосты, виниры, каппы). С помощью 3D-принтеров изготавливают инструменты для хирургических вмешательств: скальпели, щипцы, зажимы и т. д., что повышает качество оперативной работы. Возможности аддитивных технологий заключаются в создании конструкций необходимой геометрической формы. В области имплантологии воспроизведение оптимальной текстуры костных тканей в образцах улучшает процесс их остеоинтеграции.

В технологии 3D-печати используются различные материалы в зависимости от поставленных задач. В частности, описано

применение гигиенических капп, изготовленных из пластмассы [3]. Широкое распространение получают нержавеющая хирургическая сталь, титановые, кобальт-хромовые составы благодаря их биосовместимости. Наиболее перспективными считаются сплавы на основе кобальта, обладающие низкой электропроводностью и способствующие образованию защитного слоя. Поэтому такие материалы применяются для изготовления хирургических имплантатов [4, 5].

В различных областях науки и практики, обслуживающих многие разделы медицины, в том числе стоматологии, используются технологии объемной печати сложных объектов. Значительно расширяется ассортимент и снижается стоимость 3D-принтеров. Воздействие мощных лазерных систем и новых настроек позволяет оптимизировать излучение и осуществлять ускорение печати. В отечественной и зарубежной литературе приводятся сведения о широком использовании аддитивных технологий для изготовления моделей, временных протезов, хирургических шаблонов, других объектов для работы [6, 7, 8]. Изучаются вопросы материальных затрат при использовании цифровых методов. Авторы предлагают принципы работы «оцифрованных» лабораторий [9].

Цель настоящей работы – ознакомить заинтересованных лиц с применением в Республике Беларусь аддитивных технологий и 3D-печати в медицинских специальностях.

Материалом исследования служили данные литературных сообщений, докладов конференций, собственных лабораторных и клинических наблюдений.

Результаты и обсуждение. В Республике Беларусь 3D-печать находит широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, в том числе развиваясь в медицинских специальностях. Так, результаты применения отечественных имплантатов из пористого титана в хирургии позвоночника (ГУ «Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии») публиковались и докладывались на конференции «Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь». Доказано, что использование 3D-модели сокращает продолжитель-

ность хирургического вмешательства, снижает время нахождения пациента в наркозе и объем кровопотери, значительно уменьшает получаемую в процессе выполнения операции лучевую нагрузку как для пациента, так и для операционной бригады. Высокая степень безопасности установки винтов при помощи индивидуальных навигационных шаблонов указывает на снижение рисков и осложнений оперативного вмешательства.

Описаны перспективы предоперационного планирования с применением объемных моделей для отработки практических навыков перед сложным хирургическим вмешательством на позвоночнике [10–12].

Значение 3D-печати для кардиохирургии (ГУ «Республиканский научно-практический центр «Кардиология») также освещалось в сборнике докладов «Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь». В результате применения разработанного метода с использованием 3D-технологий визуализации и печати обеспечено значительное улучшение непосредственных и отдаленных результатов хирургического лечения пациентов с обструктивными заболеваниями левого желудочка сердца лабораторий [13].

Прозвучали доклады об опыте применения аддитивных технологий в практической деятельности онкологов. Представлены материалы, полученные при успешном лечении опухолей таза.

Имеется положительный результат хирургического лечения опухоли, локализующейся в головном мозге, с применением образца 3D-печати.

Инновационные технологии 3D-печати позволили белорусским стоматологам решить задачу изготовления индивидуального кламмера с заданными параметрами. Программы Autodesk Maya и Autodesk Fusion 360 обеспечили создание трехмерной графики (полигональной, вексельной и сплайновой). Использовался 3D-принтер Formlabs Form2. Технология печати – лазерная стереолитография (SLA), в основе которой лежит полимеризация лазерными лучами фотополимера. Полученная трехмерная модель служила основой для планирования 3D-печати с использованием выжигаемых полимерных материалов, далее осуществ-

влялся перевод образцов из композита в металл и окончательная обработка кламмеров, учитывающих индивидуальные особенности зубов.

Стоматологами проведены междисциплинарные исследования в рамках проектов ГНТП «Новые методы оказания медицинской помощи» подпрограмма «Хирургические заболевания» задание «Разработать методы костной имплантации при съемном и несъемном протезировании», ГПНИ «Медицина и фармация» задание «Разработать и внедрить в практику методы лечения одиночных включенных дефектов зубных рядов с использованием костных имплантатов». Наиболее эффективным является применение комплекса методов 3D-исследования и лечения, который включает рентгенконтроль (КЛКТ), объемное сканирование челюстей, изготовление лабораторной модели и стоматологических образцов посредством 3D-печати. Осуществляется работа с использованием компьютерного программного обеспечения. Широкое применение нашли хирургические шаблоны для установки внутрикостных имплантатов. По результатам сканирования органов полости рта применяется конусно-лучевая компьютерная томография для построения виртуальной 3D-модели. Компьютерное планирование хирургического шаблона позволяет создать файл, который переносится на 3D-печать. После изготовления контроль изделия осуществляется в клинике перед оперативным вмешательством, а затем используется в хирургической операции. Таким образом, аддитивные технологии способствуют существенному повышению качества стоматологических воздействий.

Продолжительность процесса характеризуется примером практической работы стоматологической клиники. Хирургические шаблоны выполнялись посредством 3D-печати в зуботехнической лаборатории ООО «ЦифроЛаб». Продолжительность выполнения шагов со второго по шестой составляет порядка 2-х часов при наличии хороших навыков у ортопеда и хирурга по работе с интраоральным сканером и владения программным обеспечением по изготовлению 3D-моделей и хирургического шаблона. На выполнение шестого шага (3D-печати) требуется

от 2 до 3 ч в зависимости от размеров изделия, качества печати и аддитивной технологии, использованной в 3D-принтере. На итоговую обработку (шаги 7–8), затрачивается около 30 минут и 45 минут на дезинфекцию (автоклавирование) изделия. Таким образом, среднее время на изготовление хирургического шаблона составляет порядка 6–7 ч, включая выполнение сканирования челюстей и все этапы вплоть до получения хирургического шаблона для проведения операции имплантации. Использование шаблона существенно снижает риск возникновения ошибок в процессе установки зубных имплантатов и значительно повышает качественный показатель на всю комплексную работу по изготовлению в полости рта ортопедической конструкции. Кроме того, оттиски могут применяться в учебном процессе наряду с изготовленными методом 3D-печати искусственными моделями, что позволяет отрабатывать мануальные навыки при лечении заболеваний зубов.

Заключение. В области медицинских клинических дисциплин все более востребованным становится персонал, владеющий современными технологиями. Речь идет о работниках здравоохранения с высшим и средним образованием и в наибольшей степени – преподавателях специальных дисциплин, что теснейшим образом связано с применением 3D-печати и аддитивных методов в различных областях медицины. В частности, в стоматологии аддитивные технологии используются для изготовления ортопедических конструкций, хирургических шаблонов, лицевых имплантатов. Перспективным направлением считается моделирование индивидуальных зубных протезов (коронки, мосты). С помощью 3D-принтеров можно изготавливать инструменты для хирургических вмешательств: скальпели, щипцы, зажимы и т. д., что повышает качество оперативной работы. Возможности 3D-технологий заключаются в создании конструкций необходимой геометрической формы. В области хирургии воспроизведение оптимальной формы челюсти в шаблонах улучшает процесс установки имплантатов. Таким образом, цифровые технологии упрощают рабочий процесс, минимизируют риск ошибок и осложнений, сокращают трудозатраты, благодаря тому,

что 3D-принтеры производят большое разнообразие требуемых образцов с минимальной погрешностью. Аддитивные технологии могут применяться для изготовления стереолитографических образцов на основе компьютерного моделирования. Использование цифровых технологий представляет для пациентов серьезную значимость вследствие уменьшения психологической нагрузки, снижения инвазивности вмешательств, а также сокращения этапов и длительности работы.

Список использованных источников

1. Schwelger, J. 3 D-печать в стоматологии / J. Schwelger, J. F. Guth, J. Turpl // Новое в стоматологии. – 2018. – № 1. – С. 12–15.
2. Белоус, С. Полностью интегрированная CAD/CAM-система для вашей стоматологической практики / С. Белоус // DentalTimes. – 2017. – № 32. – 6 р.
3. Холл Хоппе, А. Напечатанная на 3D принтере капа помогает пожилым людям бороться с зубным налетом / А. Холл Хоппе // Dental Tribune. – 2017. – № 7. Т. 4. – С. 1–2.
4. Илющенко, А. Ф. Аддитивное производство металлических изделий медицинской техники / А. Ф. Илющенко, Т. Л. Талако, А. И. Лецко // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 30 мая 2018 г.) / Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А.Ф. Илющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2018. – С. 9–18.
5. Singh, S. Material issues in additive manufacturing: A review / S. Singh, R. Singh, S. Ramakrishna // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 25. – P. 185–200.
6. Бурзин, Х. Имплантация с использованием хирургического шаблона в эстетически значимой зоне / Х. Бурзин, Пурви Бхаргава // Dental Tribune. – 2021. – № 5. – P. 1–4.
7. Луцкая, И. К. Цифровые компьютерные технологии в современной стоматологии / И. К. Луцкая // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь = Opportunities for the development of additive technologies in the Republic of Belarus : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 27 сент. 2023 г.) / Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Илющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2023. – С. 111–116.
8. Разоренов, А. Н. Изготовление кламмеров для фиксации коффердама с помощью 3D-печати / А. Н. Разоренов, Т. Н. Манака, А. А. Носульчик // Современная стоматология. – 2018. – № 3. – С. 40–42.
9. Энтони, М. Полностью цифровой рабочий процесс с изготовлением временных реставраций методом трехмерной печати / М. Энтони, Эндрю Чо // Dental Tribune Russia. – 2021. – № 7. – P. 8–10.

10. Бабкин, А. В. Применение отечественных имплантатов из пористого титана в хирургии позвоночника (ГУ «Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии», г. Минск, Беларусь) / А. В. Бабкин // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь = Opportunities for the development of additive technologies in the Republic of Belarus : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск 30 мая 2018 г.) / Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2018. – С. 18–23.

11. Первый опыт применения технологии 3Д печати в качестве предоперационного планирования / С. И. Кириенко [и др.] // Медицинские новости. – 2020. – № 8. – С. 49–51.

12. Аддитивные технологии в хирургии позвоночника. Опыт применения / Е. В. Ковалёв [и др.] // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь = Opportunities for the development of additive technologies in the Republic of Belarus : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 27 сент. 2023 г.) / Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2023. – С. 94–96.

13. Применение 3D-печати в кардиохирургии (ГУ «Республиканский научно-практический центр «Кардиология» г. Минск, Беларусь) / В. В. Андрушук [и др.] // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь = Opportunities for the development of additive technologies in the Republic of Belarus : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 21 сент. 2022 г.) / Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2022. – С. 9–10.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ В ТВЕРДЕЮЩИХ КОМПОЗИЦИЯХ И КЕРАМИКЕ НА ИХ ОСНОВЕ

**О. Н. Мусская, В. К. Крутько, И. Е. Глазов,
Е. Н. Крутько, А. И. Кулак**

*Институт общей и неорганической химии
НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*

Биоматериалы на основе синтетических фосфатов кальция, главным образом, гидроксиапатита (ГА) и трикальцийфосфата (ТКФ), являются широко востребованными в клинической практике при замене либо восстановлении кости [1–5]. Однако эти