**Современные аддитивные технологии в стоматологии: клиническое применение и возможные ограничения**

**Введение**

Появление цифровых технологий в стоматологии изменило работу врача и взгляды пациентов на стоматологическую помощь тоже. В связи с растущим спросом на более быстрое стоматологическое лечение практикующие врачи и научные сотрудники постоянно задумываются об автоматизации и стандартизации обработки стоматологических материалов. Этот сдвиг парадигмы часто называют «цифровизацией» в стоматологии, которая основана на трех основных элементах, а именно: сбор данных, обработка данных и производство данных [1\*].

К сбору данных относится получение цифрового изображения тканей с использованием внутриротового сканера и/или настольного дигитайзера. Цифровое изображение используется в качестве основы для создания виртуального дизайна реставрации, известного как обработка данных. Этот виртуальный проект помечен как файл стандартного языка преобразования (STL). Производство данных является заключительным шагом в цифровизации, который включает преобразование виртуального файла STL в его физическую форму [2\*].

Производство данных может осуществляться с помощью аддитивных или субтрактивных технологий. Субтрактивное производство относится к управляемому компьютером фрезерованию твердого блока для изготовления желаемой реставрации [3\*], в то время как аддитивное производство определено Американским обществом испытаний и материалов (ASTM) как «процесс соединения материалов для создания объектов из данных 3D-модели, обычно слой за слоем, в отличие от субтрактивных методов производства» [4\*]. Несмотря на то, что субтрактивное производство обычно использовалось в течение последних двух десятилетий для изготовления стоматологических реставраций, у него есть недостатки, включающие отходы сырья, высокий износ фрезерных инструментов, ограниченную геометрическую воспроизводимость и появление микротрещин в реставрациях. Однако аддитивное производство является относительно новой технологией, которая начала отодвигать субтрактивное производство на второй план в качестве последнего шага в цифровизации в силу его универсальности и возможности настройки при производстве сложных геометрических фигур.

Международная организация по стандартизации (ISO-TC 261/ISO 17296 2:2015) классифицировала аддитивное производство на семь категорий: VAT-полимеризация (VP), распыление материала (MJ), экструзия материала (ME), распыление связующего (BJ), сплавление на основе порошка (PBF), ламинирование листов (SL) и прямое энергетическое осаждение (DEP) [5\*]. Практически во всех областях стоматологии параметры точности и правильности являются важными для прецизионности конечного продукта.

Точность 3D-принтера определяется двумя параметрами: корректность и степень точности. Корректность - это мера разницы в размерах между фактическим объектом и его транскрипцией аддитивного производства, в то время как степень точности относится к воспроизводимости размеров или повторяемости, связанной с несколькими итерациями транскрипции аддитивного производства. Самый маленький размер деталей, который каждая технология может воспроизвести из исходного файла STL, называется «разрешением». Для 3D-принтера каждая ось (x,y,z) характеризуется собственным разрешением в точках на квадратный дюйм (dpi), а ось z соответствует толщине слоя [6\*].

**Цель**

Целью этого обзора была оценка текущих технологий аддитивного производства. Также была рассмотрена возможность применения этих технологий в клинике. Особенное внимание уделялось металлам, полимерам и керамике [7\*].

**Материалы и методы**

*VAT-полимеризация*

В зависимости от источника света, используемого для полимеризации, можно выделить четыре различных технологии VAT-полимеризации (VP): стереолитография (SLA), цифровая обработка света (DLP), жидкокристаллический дисплей (LCD), также называемый полимерной печатью при дневном свете (DPP), и непрерывное производство жидкостной поверхности раздела (CLIP).

Процедура стереолитографии использует лазер или ультрафиолетовый свет для изготовления желаемого объекта слой за слоем. Платформа для сборки последовательно опускается в чан, заполненный светочувствительной смолой, после чего подвергается воздействию ультрафиолетового света по схеме, определяемой геометрией поперечного сечения каждого слоя объекта. Чтобы защитить объект от стирающего действия платформы сборки и силы тяжести, используются опорные конструкции, которые дополняют стандартный языковой файл преобразования перед печатью. Изготовленная деталь затем подвергается процедурам постобработки, которая включает удаление излишков смолы и несущих структур с последующей полимеризацией в ультрафиолетовой камере.

Цифровая обработка света (DLP) основана на технологии VAT-полимеризации, но отличается от стереолитографии используемым источником света. Цифровая обработка света использует цифровое микрозеркальное устройство (DMD) для отражения света и полимеризации каждого слоя [8\*], тогда как технология жидкокристаллического дисплея, или полимерной печати дневного света, использует дневной свет, проецируемый на жидкокристаллические дисплеи (LCD) вместо ультрафиолетовых лазеров или проекторов для полимеризации смол, которая делает ее недорогой по сравнению с другими технологиями.

Наконец, технология с применением непрерывного производства поверхности раздела жидкостей использует цифровое микрозеркальное устройство для полимеризации светочувствительной смолы через проницаемое для кислорода окно из фторполимера, которое создает зону, называемую «мертвой зоной», где полимеризация между окном и полимеризуемой частью подавляется. Технология непрерывного производства поверхности раздела жидкостей создает трехмерный объект непрерывно, а не поэтапно, тем самым ускоряя производственный процесс [9\*].

В итоге, разрешение печатного объекта, полимеризованного в чане, характеризуется свойствами светочувствительной смолы и параметрами обработки, включая световую энергию, длину волны, скорость принтера, положение платформы сборки, программное обеспечение для слайсера, параметры печати, опорные конструкции, угол печати, цвет смолы, геометрия объекта и процедуры постобработки [10–12\*].

*Применение технологий VAT-полимеризации в стоматологии на полимерной основе*

Технологии VAT-полимеризации могут использоваться для производства широкого спектра устройств на основе полимеров в стоматологии, а именно диагностических моделей, индивидуальных ложек, направляющих для позиционирования индивидуальных абатментов, шаблонов для препарирования зубов, временных реставраций зубов, силиконовых индексов, окклюзионных средств, полных зубных протезов, шаблонов для литья или прессования стоматологических реставраций и хирургических шаблонов.

Одним из простейших применений технологии VAT-полимеризации было изготовление диагностических моделей [8\*]. Точность моделей, полученных с использованием процедур полимеризации в чанах, была описана в стоматологической литературе как клинически приемлемый метод получения диагностических моделей [13\*]. В исследовании in vitro Patzelt et al. [14\*] сравнили точность диагностических моделей фрезерованного и аддитивного производства, полученных на основе цифровых сканирований, выполненных с помощью лабораторного сканера и трех различных изображений.

Согласно его результатам, стереолитографические модели показали более высокую точность, чем их фрезерованные аналоги, но точность для их применения в ортопедической стоматологии все еще оставалась сомнительной. Hazeveld et al. [15\*] сравнили точность диагностических моделей, изготовленных с использованием трех технологий аддитивного производства (цифровая обработка света, струйная обработка материала и сплавление на основе порошка), где результаты подтвердили, что цифровая обработка света является клинически приемлемым методом изготовления ортодонтических моделей.

Технологии VAT-полимеризации также могут использоваться для изготовления рабочих моделей для конструкций с опорой на зубы или имплантаты. Однако стоматологической литературы, касающейся точности этих моделей, недостаточно. Точность окончательных моделей, изготовленных с использованием этой технологии, может быть определена путем оценки трехмерных пространственных искажений фиксированных реперных точек. Revillaleon et al. [16\*] оценили размерные деформации в положениях реплик имплантата в стереолитографии, цифровой обработке света, струйной обработке материалов и традиционных обработанных гипсовых моделях с использованием координатно-измерительной машины (CMM). Согласно этому исследованию, цифровая обработка света не показала значительно лучших результатов по сравнению с обычным стоматологическим гипсом при изготовлении модели.

Технология VAT-полимеризации также позволяет изготавливать индивидуальные оттискные ложки. Ложки изготавливаются виртуально по цифровым моделям с использованием стоматологического программного обеспечения или программного обеспечения для компьютерного проектирования с открытым исходным кодом, а затем создаются с использованием 3D-принтера для полимеризации в чанах. Цифровое управление индивидуальной ложкой дает несколько преимуществ, таких как контроль над удлинением ложки, равномерная толщина оттискного материала и минимизация ручных манипуляций. В некоторых исследованиях технологии VAT-полимеризации использовались для изготовления индивидуальных оттискных ложек в имплантологии [17,18\*].

В ограниченном количестве исследований изучались биосовместимость, химический состав, механические свойства и клиническое поведение технологий VAT-полимеризации для изготовления временных реставраций [19–23,24\*]. Tahayeri et al. [25\*] сообщили, что временные реставрации для стереолитографического аддитивного производства показали сопоставимые механические свойства с их эквивалентами, обработанными традиционным способом, подходящим для внутриротового использования. Кроме того, ahn et al. [26\*] обнаружили значительно более высокую износостойкость временных реставраций для стереолитографии и цифровой обработки света по сравнению с полимерами, обработанными традиционным способом. В другом исследовании cho et al. [27\*], аналогичные тенденции наблюдались в том, что прочность на разрыв и излом временных реставраций, обработанных стереолитографией и цифровой обработкой света, были сопоставимы с таковыми у фрезерованных и обработанных традиционным способом. Alharbi et al. [28\*] оценили влияние ориентации направляющих на механические свойства цилиндрических образцов, напечатанных на гибридной композитной смоле, где образцы с вертикальной печатью со слоями, ориентированными перпендикулярно направлению нагрузки, показали значительно более высокую прочность на сжатие, чем образцы с горизонтальной печатью со слоями, ориентированными параллельно направлению нагрузки. Силиконовые индексы для полимеризации в чане использовались для проведения интерференции в диагностических целях при тестовых реставрациях, прямых композитных реставрациях и временных реставрациях [29,30\*].

В отличие от индексов, обрабатываемых традиционным способом, индексы стереолитографии экономят время у врача, устраняя необходимость в ручной диагностической моделировке и обеспечивая точный внутриротовой перенос созданных в цифровой форме изображений [31\*]. Кроме того, обработка силиконовых индексов путем полимеризации в чане более рентабельна, чем традиционные методы [32\*].

В нескольких исследованиях изучались технологии VAT-полимеризации для изготовления окклюзионных приспособлений [33–36\*]. Технологии цифрового дизайна и аддитивного производства оптимизируют изготовление окклюзионных приспособлений, избегая ручных манипуляций, связанных с этим процессом [37\*]. В ряде исследований сообщается, что окклюзионные материалы для аддитивного производства демонстрируют сопоставимые свойства по сравнению с их аналогами, обработанными традиционным способом [34–36\*]. Однако, согласно исследованию Lutz et al. [38\*], окклюзионные устройства с цифровой обработкой света демонстрируют меньшую износостойкость и устойчивость к нагрузке, чем фрезерованные и обработанные традиционным способом устройства. Напротив, результаты исследования Prpic et al. [39\*] указали, что механические свойства окклюзионного приспособления зависят от материала, а не от используемой технологии. Рекомендуются дальнейшие доклинические и клинические исследования для оценки поведения этих окклюзионных устройств аддитивного производства.

Процедуры полимеризации в чане также использовались в качестве инструмента для изготовления полных съемных протезов [40–42\*], которые включают индивидуальную печать и последующую сборку базиса протеза и зубов [43,44\*]. Части съемных протезов, изготовленные с применением технологии полимеризации в чанах, продемонстрировали адекватную устойчивость к нагрузке, поэтому их можно использовать для изготовления съемных протезов [45\*]. Более того, стереолитография продемонстрировала более высокую общую точность изготовления, чем базисы протезов, полученные литьем под давлением [46\*]. Рекомендуются дальнейшие исследования для оценки механических свойств и долговременного поведения в полости рта полных съемных протезов аддитивного производства [47\*]. Технология VAT-полимеризации была дополнительно исследована для применения в изготовлении восковых моделей, используемых для получения литых металлических каркасов, протезов с опорой на зубы, каркасов для частичных съемных протезов (RPD) и прессованных керамических реставраций [48–50\*].

Аддитивное производство лучше подходит, чем субтрактивное производство, для изготовления сложных неоднородных геометрических форм каркасов частичных съемных протезов. Цифровые съемные частичные каркасы протезов разрабатываются в программном обеспечении CAD с использованием данных трехмерной модели, полученных в результате внутриротового или лабораторного сканирования гипсовой модели. После этого каркас печатается в виде воскового или пластмассового шаблона, который затем отливается в металле. В связи с этим Williams et al. [50\*] виртуально разработали съемный каркас частичного протеза на модели с электронным обзором и использовали стереолитографию для печати заменяемого съемного каркаса частичного зубного протеза из пластика. Программное обеспечение CِAD также можно использовать для цифровой восковой моделировки для изготовления литых и прессованных стоматологических реставраций. Образцы напечатаны в воске, оклеены и отлиты из металла или спрессованы из керамики на основе дисиликата лития. Исследования изучали точность окончательных реставраций, полученных на основе моделей аддитивного производства [48,49\*]. Точность модели аддитивного производства была проанализирована путем оценки зазора между обработанной окончательной реставрацией и препарированным зубом или моделью. Fathi et al. [47\*] оценили краевые и внутренние несоответствия в прессованных коронках из дисиликата лития, изготовленных с использованием сделанных вручную фрезерованных и отпечатанных моделей. Соответственно, коронки, изготовленные с использованием моделей аддитивного производства, продемонстрировали клинически приемлемую и лучшую посадку, чем коронки, изготовленные с использованием фрезерованных или изготовленных вручную моделей [48\*]. Эти результаты согласуются с результатами исследований, проведенных Mai et al. И Kim и др. [51,52\*]. В области хирургии для автоматизированного производства хирургических шаблонов применялась VAT-полимеризация [53–57\*]. Цифровые оттиски и данные компьютерной томографии (КЛКТ) оказались надежными исходниками для виртуального изготовления и последующего аддитивного производства хирургических шаблонов. Giacomo et al. [53\*] использовали стереолитографическую печать для изготовления хирургических шаблонов, предполагая, что это полезный инструмент для изготовления шаблонов и установки по ним имплантатов в зависимости от дальнейших клинических исследований. Однако с тех пор несколько исследований дали многообещающие результаты в этой области. Sarment et al. [55\*] сообщили об улучшении установки имплантата с помощью стереолитографических шаблонов аддитивного производства, разработанных с использованием данных КЛКТ. Кроме того, Ozan at al и др. [56\*] проанализировали отклонения при установке имплантата с помощью стереолитографических шаблонов с опорой на зубы и слизистые оболочки. Согласно этому исследованию, стереолитографические направляющие, полученные на основе данных КЛКТ, считались способствующими надежной установке имплантата с использованием направляющих с опорой на зубы. С другой стороны, противоречивые результаты исследования Reyes et al. [54\*] сообщили, что они лучше подходят для хирургических шаблонов, изготовленных традиционным способом, а среди стереолитографических шаблонов те, которые изготовлены с использованием оптического сканирования, очевидно, продемонстрировали лучшее соответствие, чем шаблоны на основе КЛКТ.

*Применение керамики с использованием технологий VAT-полимеризации в стоматологии*

Процедуры полимеризации в чане для обработки стоматологической керамики включают два дополнительных этапа. Первый этап включает термическую обработку для удаления органических связующих, а второй этап - высокотемпературное спекание для уплотнения керамики. Dehurtevent et al. [58\*] изучили возможность получения суспензий оксида алюминия с содержанием сухого вещества 75% и 80% для стереолитографии и продемонстрировали изготовление керамической коронки премоляра верхней челюсти с использованием суспензии оксида алюминия с содержанием сухого вещества 80% и крупными (1,56±0,04 мкм) частицами. В то время как в одном исследовании керамика, изготовленная с помощью стереолитографии, показала более высокую устойчивость к нагрузке, чем их аналоги, полученные методом сухого прессования [59\*], Zandinejad et al. [60\*] не обнаружили существенных различий в устойчивости к нагрузке фрезерованных и стереолитографических коронок из диоксида циркония. Однако с точки зрения краевого и внутреннего прилегания Revilla-leon et al. [50\*] сообщили о клинически приемлемых значениях для керамических коронок, изготовленных с помощью стереолитографии. Помимо керамических коронок, стереолитография использовалась для печати циркониевых имплантатов с высокой размерной точностью [56\*]. Образцы имплантатов, изготовленные при угле наклона 0°, продемонстрировали значительно более высокую характеристическую прочность, чем образцы, изготовленные при угле наклона 45° или 90°. Однако микроструктурный анализ образцов выявил значительную пористость и трещины, что требует поиска точных доказательств, прежде чем технология сможет перейти в клиническую практику [61\*].

*Распыление материала*

Распыление материала (MJ) работает аналогично струйной печати, но в отличие от однослойной печати, лоток опускается последовательно с печатью и полимеризацией каждого последующего слоя жидкого фотополимера, в конечном итоге создавая трехмерный объект. Капли материала выборочно осаждаются различными соплами, движущимися по оси x-y, на рабочую платформу, которая пересекает ось z. Основными преимуществами этого метода являются высокая точность, низкий уровень отходов материала и возможность печатать на нескольких материалах разными цветами, поскольку каждое сопло может содержать разную смолу [62–64\*].

*Применение технологий распыления материала в стоматологии*

Существует значительное совпадение в клиническом применении технологий MJ и стереолитографии в отношении изготовления устройств и протезов на основе полимеров.

Несмотря на то, что с помощью струйной печати можно печатать объекты разными цветами или материалами, его применение ограничено смолами, которые можно использовать в качестве чернил. Фактически, технологии VAT-полимеризации используются чаще, чем технологии распыления материалов. Подобно чановой полимеризации, струйная обработка материала может использоваться для печати диагностических моделей и использования данных оцифрованных 3D-моделей для изготовления индивидуальных ложек, направляющих для позиционирования индивидуальных абатментов, направляющих для препарирования зубов, временных реставраций зубов, силиконовых индексов, окклюзионных устройств, полных съемных зубных протезов, могут быть изготовлены шаблоны для литья или прессования стоматологических реставраций и хирургические шаблоны. Ebert et al. [65\*] использовали суспензию диоксида циркония в качестве основы для прямой струйной печати керамической коронки, где коронка была напечатана как плотное сырое тело, которое подвергалось удалению связующего и последующему спеканию. Согласно этому исследованию, механические свойства образцов диоксида циркония для прямого струйного аддитивного производства существенно не различались по сравнению с их размолотыми эквивалентами. Аналогичное исследование показало, что образцы диоксида циркония, изготовленные методом прямой струйной аддитивной печати, обладают более высокой прочностью на изгиб, чем их аналоги, полученные методом шликерного литья [66\*].

*Экструзия материала*

Экструзия материала, также известная как моделирование наплавленного осаждения (FDM), использует термопластические полимеры, которые выдавливаются из нагретого сопла принтера, чтобы изготовить трехмерный объект слой за слоем на рабочей платформе, которая перемещается по оси z. Экструзия материалов из-за своей невысокой стоимости является одной из наиболее широко используемых технологий 3D-печати. Однако отделка поверхности и конечное качество продукта аддитивного производства хуже по сравнению с другими технологиями [67\*]. Одна интересная модифицированная версия экструзии материала - это роботизированная разливка, которая включает автоматическое выдавливание псевдопластического материала из сопла [68\*].

*Применение технологий экструзии материалов в стоматологии*

Несмотря на то, что для обработки полимеров можно использовать экструзию материала, получаемая точность и шероховатость поверхности хуже по сравнению с технологиями полимеризации в чане и струйной обработки материалов. Однако технология экструзии роботизированного материала для изготовления керамических коронок [5\*] может иметь потенциальное применение в будущем. Тем не менее, факторы, влияющие на роботизированное литье керамических объектов, такие как критическая высота сопла, pH и вязкость керамической суспензии, должны быть скорректированы [69,70\*]. Wang et al. [71\*] исследовали эти параметры обработки и изменили их для роботизированного литья керамических коронок. Качество обработки поверхности коронок, изготовленных методом аддитивного производства, находилось в клинически приемлемом диапазоне от 20 до 50 мкм. Таким же образом Silva et al. [72\*] использовали аналогичную технику для изготовления циркониевых колпачков и получили те же результаты.

*Сплавление на основе порошка*

В технологиях сплавления на основе порошка (PBF) используются порошковые субстраты, которые наносятся на рабочую платформу слоями с помощью роликовых ножей. Подтверждая заданную геометрию поперечного сечения, каждый слой избирательно сплавлен перед последовательным добавлением следующего. В настоящее время доступны три типа технологий плавления на основе порошков: селективное лазерное плавление (SLM), селективное лазерное спекание (SLS) и электронно-лучевое плавление (EBM) [73,74\*]. Среди них селективное лазерное спекание использует мощный лазерный луч (Na:YAG), который нагревает порошок в герметичной камере до температуры чуть ниже точки плавления [75\*]. Это приводит к частичному плавлению и сплавлению частиц порошка слой за слоем [76\*]. Селективное лазерное плавление аналогично селективному лазерному спеканию, за исключением того факта, что оно нагревает порошок до температуры плавления, что приводит к полному сплавлению частиц порошка. Электронно-лучевая плавка использует пучок электронов высокой энергии в среде благородных газов, таких как аргон. Затем вольфрамовая нить (катод) нагревается до температуры 3000 ° C для испускания электронов, при этом анод вызывает ускорение электронного луча, направленного на металлический порошок с помощью магнитных катушек. Столкновение высокоэнергетических электронов с металлическим порошком преобразует их кинетическую энергию в тепло, которое отвечает за плавление металлического порошка. Для термостойкости и снижения внутренних напряжений в инертной камере поддерживается температура 700 °C [77,78\*].

*Применение технологий сплавления на основе порошков в стоматологии*

Технологии сплавления на основе порошков могут быть использованы для изготовления металлических каркасов из кобальта-хрома (Co-Cr) и титана (Ti) для частичных съемных протезов (RPDS) и несъемных зубных протезов с опорой на зубы или имплантаты. Кроме того, сплавление на основе порошков также изучалось в лабораторных исследованиях для изготовления керамических составляющих в стоматологии. Исследования, в которых использовались технологии сплавления на основе порошков для изготовления каркасов Co-Cr, исследовали их точность и прочность сцепления с керамикой. Точность наплавки на порошковой основе как производственного метода экстраполирована на основании измерений зазора между металлическим каркасом и подготовленным абатментом. В связи с этим. Huang et al. [79\*] оценили краевую и внутреннюю подгонку металлокерамических коронок, изготовленных с использованием традиционной технологии выплавляемого воска и селективного лазерного плавления, где металлокерамические коронки из Co-Cr селективного лазерного плавления показали лучшее краевое прилегание, чем их традиционно изготовленные аналоги. Результаты были подтверждены в последующем исследовании [80\*]. Что касается прочности керамической связи, то не было обнаружено значительных различий между селективным лазерным плавлением и образцами, обработанными традиционным способом [81,82\*]. Селективное лазерное спекание также исследовалось для изготовления каркасов частичных съемных протезов. Согласно одному исследованию, селективное лазерное спекание является более точной техникой, с помощью которой можно изготавливать частичные съемные протезы с лучшими механическими свойствами, чем при использовании традиционной техники [83\*]. Клиническое исследование показало, что изготовление частичных съемных протезов с лазерным спеканием может привести к большему удовлетворению пациентов [84\*], но для подтверждения этого заключения все же необходимо рандомизированное исследование с более длительным периодом наблюдения.

В других лабораторных и клинических исследованиях оценивались металлические конструкции частичных съемных протезов, обработанных селективным лазерным спеканием и селективным лазерным плавлением [83–85\*], где в основном изучались сплавы Co-Cr или TIi (Ti6AL4V). Одно исследование было посвящено адаптации четырех типов частичных съемных протезов, и их результаты показали, что селективное лазерное спекание обеспечивает приемлемую посадку для всех типов протезов. Однако протезы с большим пролетом и большим количеством кламмеров, изготовленных обычным методом литья, все же продемонстрировали лучшую точность, чем протезы, напечатанные методом селективного лазерного спекания [85\*]. Селективное лазерное плавление и плавление электронным лучом также были исследованы для изготовления каркасов Co-Cr и Ti для несъемных зубных протезов на имплантатах. Точность таких структур была проанализирована в различных публикациях в литературе. Akcin at al. и др. [86\*] исследовали подгонку многоэлементных каркасов Co-Cr, изготовленных с использованием методов селективной лазерной плавки, фрезерования и методов потери парафина. Исследование выявило самые низкие значения краевого зазора для каркасов с селективным лазерным плавлением на 3 и 4 единицы и самые высокие значения в области окклюзии каркасов с селективным лазерным плавлением на 5 единиц. Revilla-leon et al. [87\*] сообщили о клинически приемлемом несоответствии между имплантатом и абатментом для каркасов с опорой на имплантаты, изготовленных методом селективного лазерного расплавления, полной дуги CO-CR, измеренного с помощью координатно-измерительной машины. Аналогичные результаты были получены для каркасов с опорой на полную дугу имплантатов, изготовленных селективным лазерным и электронно-лучевым плавлением [74\*]. Для обработки стоматологической керамики было опробовано селективное лазерное спекание [5\*], но из-за их высокой температуры спекания прямая стереолитография затрудняет изготовление керамических изделий до их необходимой плотности [88\*]. Непрямая стереолитография - это практический подход к манипуляциям с дентальной керамикой, который включает производство сырых керамических объектов, гибридизованных с полимерными связующими [89\*].

*Струйное нанесение связующего*

Струйное нанесение связующего - это технология, которая фактически была вдохновлена ​​струйными принтерами. В этом процессе порошкообразная подложка наносится на рабочую платформу слоями, которые подвергаются селективному осаждению капель связующего вещества из сопла. Для полимеризации связующего печатную структуру помещают в печь. Если печатный материал металлический или керамический, он должен пройти дополнительную стадию термической обработки или спекания соответственно [90\*].

*Применение технологий распыления связующего в стоматологии*

По этой технологии доступно ограниченное количество исследований, в одном из которых изучалась технология изготовления предварительных керамических объектов и изменялись параметры обработки для изготовления керамических коронок [91\*].

**Результаты**

Основываясь на обзоре приведенной выше литературы, можно сказать, что аддитивное производство доказало свой потенциал по нескольким направлениям и выдержало испытание временем в стоматологической практике.

**Выводы**

К выводам, сделанным из этих исследований, следует относиться с осторожностью, в особенности из-за высокой погрешности, малой выборки и небольшого количества произведенных операций в некоторых исследованиях. Поскольку большинство из них представляют собой результаты лабораторных исследований, доказательства, подтверждающие идею интеграции аддитивного производства в клиническую практику, остаются неубедительными, в частности, в отношении точности, достоверности и оценки несоответствий.

Однако можно ожидать, что аддитивное производство в сочетании с технологиями цифровой обработки изображений будет иметь большое значение в стоматологии. Универсальность этой технологии делает ее идеальной для применения в области стоматологии, которая известна своим творческим подходом. Однако стоимость и технические ограничения для применения в стоматологии препятствуют ее широкому внедрению. Будущие исследования и разработки в области этой технологии могут помочь преодолеть существующие ограничения, что приведет к повсеместной апробации и возможному снижению стоимости ее применения в стоматологии с использованием металлов, полимеров и керамики.

\*Указатели ссылок в квадратных скобках соответствуют списку литературы в первоисточнике.