

DOI: <https://doi.org/10.17816/dent642024>

# Цифровые технологии в ортодонтии на примере изготовления элайнеров: обзорная статья

С.А. Демьяненко, А.Л. Морозов, Я.Ю. Пенькова

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

## АННОТАЦИЯ

В последнее десятилетие съёмные ортодонтические термопластичные аппараты — элайнеры — стали распространённой альтернативой обычным фиксированным системам и ортодонтическим аппаратам, предназначенным для исправления неправильного прикуса путём создания нагрузок, которые приводят к определённым движениям зубов. Технология изготовления и применения элайнеров позволяет разработать собственную систему выравнивания с полным контролем желаемой толщины, протяжённости и креплений.

**Целью настоящего обзора** стал анализ методов и вариантов моделирования элайнеров, а также технологий их изготовления.

Обобщены литературные данные о методах цифровой ортодонтии при изготовлении элайнеров. Приводятся результаты исследований российских и зарубежных авторов о съёмных ортодонтических аппаратах для исправления нарушений, профилактики и лечения зубочелюстных аномалий; рассматриваются технологии моделирования и изготовления съёмных ортодонтических аппаратов, применяемые материалы.

Описаны технологии 3D-печати, которые произвели революцию в хирургическом имплантоведении, протезировании, восстановительной стоматологии, ортодонтии, имплантологии и производстве инструментов. В отличие от традиционных производственных процессов, которые включают формование и механическую обработку или использование других вычитающих методик, данная технология уникальна своим способом создания компонентов через добавление материала по слоям.

Показан многоэтапный процесс изготовления элайнеров, который включает снятие слепка с челюсти пациента и 3D (трёхмерное) сканирование этого слепка. Полученная на компьютере 3D-модель позволяет наглядно показать пациенту состояние до и после, в этой же программе создаётся серия 3D-моделей будущих элайнеров, затем они распечатываются и отправляются на производство капп.

Современный метод лечения патологического прикуса с помощью элайнеров позволяет не только добиться исправления патологии, но и выполнить ортодонтическое лечение комфортно для пациента.

**Ключевые слова:** элайнер; брекет-система; ортодонтические конструкции; ортодонтия; 3D-печать.

## Как цитировать:

Демьяненко С.А., Морозов А.Л., Пенькова Я.Ю. Цифровые технологии в ортодонтии на примере изготовления элайнеров: обзорная статья // Российский стоматологический журнал. 2025. Т. 29, № 1. С. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.17816/dent642024>

DOI: <https://doi.org/10.17816/dent642024>

# Aligner manufacturing as an example of digital technology in orthodontics: A review

Svetlana A. Demyanenko, Andrei L. Morozov, Yana Yu. Penkova

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

## ABSTRACT

In recent decades, removable thermoplastic orthodontic appliances, or aligners, have become a popular alternative to conventional fixed appliances for occlusion correction by applying loads that generate specific tooth movements. Aligner manufacturing and application technology enables a customized dental alignment system with complete control over the required thickness, length, and fixation.

**AIM:** To examine the approaches and possibilities for aligner modeling, as well as their manufacturing techniques.

The paper presents a literature review on digital orthodontics in aligner manufacturing. The findings of Russian and worldwide studies on the use of removable orthodontic appliances for occlusion correction and malocclusion prevention and treatment, as well as modeling and manufacturing techniques and materials used, are reviewed.

Moreover, the study discusses 3D printing technologies, which have revolutionized surgical implantation, prosthetic dentistry, restorative dentistry, orthodontics, implantology, and tool manufacturing. In contrast to conventional production processes, which involve molding and machining or other subtractive technologies, this technology has a unique way of producing components by adding the material layer by layer.

The paper demonstrates a multiple-stage aligner manufacturing process, which includes taking an impression of the patient's jaw and scanning it in 3D. The resulting 3D model provides representative before and after images; the same software is used to produce a series of 3D models of future aligners, which are then printed for production.

Modern occlusion correction procedures that use aligners not only improve malocclusion, but also make orthodontic treatment more comfortable for patients.

**Keywords:** aligner; braces; orthodontic appliances; orthodontics; 3D printing.

## To cite this article:

Demyanenko SA, Morozov AL, Penkova YaYu. Aligner manufacturing as an example of digital technology in orthodontics: A review. *Russian Journal of Dentistry*. 2025;29(1):79–88. DOI: <https://doi.org/10.17816/dent642024>

Received: 18.11.2024

Accepted: 11.12.2024

Published online: 20.01.2025

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие съёмные ортодонтические термопластичные элайнеры стали распространённой альтернативой обычным фиксированным системам [1], а также ортодонтическим аппаратам, предназначенным для исправления неправильного прикуса путём создания нагрузок, которые приводят к определённым движениям зубов. Традиционно в клинической практике используются несъёмные аппараты, которые включают в себя металлические дуги и брекететы. В последнее время благодаря потребности в малоинвазивных альтернативах биомедицинские исследования были направлены на разработку аппаратов, которые сочетают в себе эффективность в исправлении положения зубов с комфортом и эстетикой [2]. В области современной ортодонтии специалисты всё больше предпочитают использовать элайнеры вместо традиционных брекет-систем для коррекции прикуса. Это предпочтение базируется на уникальных преимуществах элайнеров: они, благодаря съёмным ортопедическим конструкциям, легко снимаются, что значительно упрощает уход за полостью рта; создаются на заказ по индивидуальным параметрам челюсти для каждого пациента; благодаря своей неприметности существенно повышают психологический комфорт. Данная практика становится всё более распространённой и позволяет решить проблемы большого числа пациентов, у которых выявлены различные дисфункции височно-нижнечелюстного сустава, обусловленные его комплексной структурой и функциональностью. При этом около трети пациентов с ортодонтическими проблемами нуждаются в специализированной помощи, включая применение специфических ортодонтических аппаратов для исправления нарушений [3]. Таким образом, ортодонтические элайнеры представляют собой высокоэстетичную альтернативу несъёмным ортодонтическим аппаратам, что делает их чрезвычайно востребованными, особенно среди взрослого населения [4].

В обзорной статье приводятся результаты исследований российских и зарубежных авторов в области съёмных ортодонтических аппаратов для исправления нарушений, профилактики и лечения зубочелюстных аномалий.

**Цель обзора** — рассмотреть методы и варианты моделирования съёмных ортодонтических аппаратов — элайнеров, а также проанализировать технологии их изготовления.

## ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Ортодонтия в настоящее время приближается к четвёртому витку развития с момента своего появления в качестве специальности в стоматологии в начале 1900-х гг. В те времена неправильный прикус лечили с помощью металлических колец, которые цементировали на зубы, чтобы закрепить проволоку для воздействия

на них. На рубеже 1970-х гг. ортодонтический мир приветствовал введение стандартных брекетов из прозрачных или полупрозрачных неметаллических материалов, отметив значительный прогресс в данной области. Это событие наступило после того, как десятилетием ранее, в 1960-х гг., был совершён переворот благодаря введению первых брекет-систем с использованием нержавеющей стали для скрепления проволок. Данные системы выделялись благодаря своим достоинствам: высокой прочности, способности выдерживать длительное использование, уменьшенному трению между элементами, оптимизации отвода слюны, сниженной кумуляции остатков пищи, а также относительной простоте в обработке и формировании [5]. Первые прозрачные кронштейны из незаполненного поликарбоната были заменены кронштейнами с керамическим, стекловолоконным или поликарбонатным армированием и металлической вставкой для минимизации ползучести [6]. Позже стали использовать керамические кронштейны (из монокристаллического сапфира и поликристаллической керамики), однако из-за твёрдости этих материалов могла стираться эмаль. В итоге для замены классических стальных дуг был сделан выбор в пользу материалов с передовыми характеристиками: начиная от Optiflex с его прозрачными волокнами до различных видов проводов, обработанных уникальными покрытиями — от тефлона и эпоксиды до инновационного титанового пластика и Bioforce [7]. В недавнем прошлом, включающем конец прошлого столетия и начало нынешнего, отмечается появление элайнеров, используемых в ортодонтии. Этот прогресс считается ключевым элементом в развитии современной ортодонтической науки. Он дал начало новой эре в этой отрасли, которая часто оценивается как третья революция [8].

## ЭЛАЙНЕРЫ: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

Элайнеры, изготовленные в виде прозрачных съёмных кап, нацелены на коррекцию различных несоответствий в расположении отдельных зубов, а также во всём зубном ряду и прикусе, когда последний становится постоянным. Эти устройства спроектированы так, чтобы обеспечивать контролируемое давление на зубы, выравнивая их и исправляя аномалии прикуса [9].

Прозрачные элайнеры — это индивидуальные съёмные аппараты, предназначенные для эффективного комплексного косметического ортодонтического лечения нарушений прикуса лёгкой и средней степени [10]. Аппарат обеспечивает постепенное перемещение зубов с помощью последовательных наборов пластиковых элайнеров, которые используются и заменяются в определённое время на протяжении всего лечения

[3]. В работе S. Varone и соавт. была разработана система для конкретного пациента с целью имитации ортодонтических перемещений зубов с помощью пластиковых элайнеров. Верхняя и нижняя зубные дуги были реконструированы с помощью сочетания оптических и рентгенографических методов. Затем была создана модель методом конечных элементов (FE) для анализа двух различных конфигураций элайнеров. Таким образом, авторами изучено влияние неравномерной толщины элайнера и индивидуального начального смещения между элайнером и зубами пациента [1].

В 1998 году компания Align Technology (США) представила миру систему Invisalign, состоящую из прозрачных ортодонтических капп. Эти устройства отличаются от традиционных брекетов возможностью снимать их в определённые моменты, такие как еда или уход за полостью рта, что делает их особенно привлекательными из-за эстетических качеств. Каппы устанавливаются на зубы, осуществляя коррекцию без применения каких-либо дополнительных креплений, за счёт чего их использование предполагает ношение на протяжении дня с некоторыми паузами [9]. Геометрическая посадка и свойства материала являются одними из основных факторов, влияющих на эффективность устройства. А это, в свою очередь, зависит от выбора материала и метода изготовления [11]. Как отмечают R.L. Boyd и соавт., с момента своего появления в 1999 году система коррекции зубов с помощью прозрачных элайнеров, изготовленных из полупрозрачного термопластичного материала с использованием методов компьютерного сканирования и визуализации, стала общепринятым методом лечения [12].

Ключевые достоинства использования элайнеров заключаются в невидимости при ношении (что делает их крайне привлекательными визуально) и возможности легко ухаживать за полостью рта без сторонней помощи, поскольку их можно просто снять или одеть. Кроме того, обеспечивается безопасность для слизистой оболочки полости рта и нет риска повреждения эмали зубов благодаря отсутствию необходимости в использовании твёрдых металлических или керамических элементов, взамен чего применяются мягкие замки из биосовместимых материалов. Быстрота адаптации к ношению и отсутствие ощущения чужеродного предмета в ротовой полости также выделяют элайнеры среди прочих способов коррекции зубного ряда [13]. Недостатками элайнеров являются ограниченный функционал, так как с их помощью нельзя вылечить пациента с сильной патологией прикуса (при тремах и диастемах), а также цена [3].

Несмотря на то, что в ортодонтии с использованием элайнеров были внедрены новые материалы и вспомогательные конструкции, подавляющее большинство элайнеров по-прежнему изготавливаются с помощью термоформовки [14].

## ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛАЙНЕРОВ

Технологии 3D-печати в настоящее время играют всё более важную роль в клинических и исследовательских целях в стоматологии. 3D-печать произвела революцию в хирургическом имплантоведении, протезировании, восстановительной стоматологии, ортодонтии, имплантологии и производстве инструментов [15]. В отличие от традиционных производственных процессов, которые включают формование и механическую обработку или использование других вычитающих методик, данная технология уникальна своим способом создания компонентов через добавление материала по слоям [16]. В ортодонтической 3D-печати обычно применяются различные материалы, среди которых выделяются поликарбонат, титан, сталь, серебро, фотополимеры, воск, а также полиамиды, включая стеклонанополненный полиамид и нейлон. Используются также материалы, специфичные для стереолитографии, вроде эпоксидных смол, и другие пластики, такие как полимолочная кислота и акрилонитрил-бутадиен-стирольный пластик [17].

Эту технологию можно использовать и для прямой печати прозрачных элайнеров [18]. Несмотря на то, что сегодня технология 3D-печати совершенствуется, её стоимость снижается, а применение в других областях стоматологии расширяется, можно найти лишь ограниченное количество исследований, описывающих прямую 3D-печать прозрачных элайнеров.

Для прямой печати прозрачных элайнеров можно использовать несколько процессов 3D-печати, таких как моделирование методом послойного наплавления, селективное лазерное спекание, селективное лазерное плавление, прямое послойное наплавление гранул, стереолитография, многоструйная фотополимеризация или технология непрерывного жидкостного интерфейса [19]. Однако в настоящее время наиболее подходящим вариантом является 3D-печать методом фотополимеризации из прозрачной смолы.

Ортодонтические элайнеры могут быть изготовлены путём термоформования на 3D-печатных моделях или с помощью прямой 3D-печати. Традиционная технология термоформования является непрямой по своей природе [20]. Элайнеры изготавливаются из листов прозрачного пластика с термической обработкой на оборудовании для формования под давлением или вакуумом. После этого элайнеры обрезаются и устанавливаются пациенту [12]. С помощью технологии прямой 3D-печати проектируют и изготавливают элайнер непосредственно с использованием биосовместимых прозрачных смол, что не требует создания стоматологической модели [14].

В ходе изучения технологии термоформования при изготовлении элайнеров выявлены некоторые особенности. Так, в процессе термоформования отмечено изменение толщины изделия в зависимости от свойства материала.

В ходе клинического испытания, проведённого R. Vucic и соавт., было установлено, что листы термопластика толщиной 0,75 мм до обработки варьировали в пределах 0,38–0,69 мм в разных областях после обработки [21]. Аналогичные данные получены W. Nahn и соавт. [22]. Стоит отметить, что уменьшение толщины материала элайнера на 10% может снизить упругости до 30% [23].

С целью экономии полимерного материала некоторые исследователи предлагали использовать пустотелые модели элайнеров, однако при толщине меньше 2 мм во время термоформования изделия подвергались деформации, что ставило под угрозу клиническое применение устройства [24].

Создание элайнеров — это многоэтапный процесс. Первоначально врач снимает слепок с челюсти пациента, на которой будет производиться лечение. Затем производится 3D (трёхмерное) сканирование этого слепка [25]. В случае, если врач использует инфраоральный сканер, то он получает 3D-модель, которая сразу выводится на компьютере. По завершении сканирования стоматолог вносит скан в компьютерную программу, позволяющую наглядно показать пациенту состояние до и после, в этой же программе создаётся серия 3D-моделей будущих элайнеров, затем они распечатываются и отправляются на производство капп [26].

Отметим, что в отличие от традиционной косвенной методики процесс изготовления с помощью прямой 3D-печати не требует физического создания стоматологической модели, а элайнер изготавливается непосредственно на основе 3D-данных о зубах, хранящихся в электронном виде [27]. Используемые материалы также сильно отличаются: преобладают эпоксидные смолы и фотополимеры [28]. Для этой цели было разработано и используется множество систем и процессов 3D-печати, в том числе стереолитография, моделирование методом послойного наплавления, прямое послойное наплавление, селективное лазерное спекание, многоструйная фотополимеризация или технология непрерывного жидкостного интерфейса [27]. Прямая лазерная обработка и жидкокристаллический дисплей — это быстрые процессы 3D-печати, в которых используется обычный источник света, воздействующий на всю фотополимерную смолу. Они получили признание большинства производителей 3D-принтеров [29].

Выбор подходящего материала определяется его категорией. Одной из основных категорий являются изделия, состоящие из комбинации винилацетатных элементов и полимерных соединений, что делает их чрезвычайно популярными. В качестве основной формы этих материалов выступают эластичные листы, сделанные из винилацетата и этиленполимера, их толщина варьирует от 2 до 4 мм, причём они могут быть как прозрачными, так и окрашенными в различные цвета [26]. Австралийская организация Myofunctional Research Co. использует уникальное соединение нейлона и силикона для создания

трейнеров, которые служат альтернативой элайнерам, и это один из ключевых подходов в их производстве. Отдельно стоит упомянуть о полиуретане, который занимает третье место среди используемых материалов. Будучи сложным соединением, получаемым из полиола и изоцианата, полиуретан отличается лёгкостью, устойчивостью к воздействию кислот и растворителей, что позволяет на этапе создания материала задать точные параметры трения, получая продукт с выражено низкими или, наоборот, высокими характеристиками [30].

С развитием цифровых технологий и материаловедения использование интегрированных систем производства расширяет возможности изготовления элайнеров путём непосредственной печати, а не только подготовки рабочих моделей.

Печать элайнеров на 3D-принтере реализуется последовательно по следующим этапам: сбор данных с помощью сканирования, виртуальное планирование и автоматизированное проектирование прозрачных элайнеров, 3D-печать с использованием соответствующей комбинации смолы и принтера и постобработка.

Для получения данных о пациенте, таких как состояние зубов, дёсен и прикуса/окклюзии, используются цифровые сканеры, работающие по прямому или косвенному принципу. Прямой метод предполагает использование внутриротных сканеров при сборе данных для создания 3D-моделей; косвенный метод предполагает сканирование слепков/гипсовых моделей с помощью настольного сканера или сканера на основе компьютерной томографии [31]. Использование прямых внутриротных сканеров, например медицинских электрических устройств класса I стандарта ANSI/IEC 60601-1, устраняет необходимость в альгинатном/эластичном оттиске и обеспечивает комфорт для пациента по сравнению с традиционным подходом [32].

Цифровые сканеры способны записывать, хранить и передавать информацию, а также проводить окклюзионную оценку, базовые измерения и анализ моделей. Полученные в результате сканирования данные экспортируются в программное обеспечение для планирования лечения.

Программное обеспечение, предназначенное для автоматизированного проектирования элайнеров, позволяет сегментировать отдельные зубы и постепенно восстанавливать их в нужной конфигурации. Выходные данные можно передать в программное обеспечение для нарезки, чтобы приступить к 3D-печати прозрачных выравнивающих пластин.

3D-печать — это метод, предполагающий быстрое создание физических прототипов с помощью автоматизированного производства. Технологии быстрого прототипирования (rapid prototyping) можно разделить на аддитивные и субтрактивные методы. Аддитивный метод производства создаёт объект слой за слоем, субтрактивный метод предполагает удаление материала для создания того же объекта [33]. 3D-принтеры, используемые

для аддитивного производства, работают по всем трём осям, включая два планарных измерения (X: вправо-влево; Y: спереди-назад) и измерение Z (вверх-вниз). Тип технологии печати, толщина каждого слоя печати (Z-разрешение), ориентация печати (0, 25, 45, 90°) по отношению к рабочей поверхности и общая высота проектируемого объекта определяют время, необходимое для печати.

Среди технологий обработки наибольшее внимание при изготовлении элайнеров на данный момент уделяется полимеризации в чане. Полимеризация в чане — это метод 3D-печати, при котором жидкая полимерная смола заливается в чан и затвердевает под воздействием ультрафиолетового света. Важными технологиями печати, основанными на этом методе, являются стереолитография, цифровая обработка света и жидкокристаллический дисплей [34]. Принцип стереолитографии заключается в использовании концентрированного ультрафиолетового лазерного излучения, которое за один раз обрабатывает небольшую определённую область [33]. С помощью тех же методов и последующей обработки были получены различные механические свойства выравнивающего слоя при использовании разных технологий печати [18].

Для изготовления элайнеров используются различные термопластичные материалы или их комбинации из-за своих превосходных характеристик [35]. К ним относятся поливинилхлорид, полиуретан, полиэтилентерефталат и полиэтилентерефталатный гликоль [36]. Современный процесс разработки прозрачных корректоров для зубов отличается высокотехнологичным подходом. Изначально для создания точного плана лечения используется либо сканирование зубного ряда с помощью 3D-сканера прямо во рту пациента, либо сканирование гипсовой модели зубов, перенесённой в цифровой формат. Дальнейшее планирование коррекции зубного ряда осуществляется с применением специализированного программного обеспечения [37]. Каждый элайнер в комплекте для коррекции зубов требует создания уникальной трёхмерной модели. Это достигается путём использования технологий, таких как 3D-печать, стереолитография или же струйная техника. Далее эти модели служат основой для формирования элайнеров из специального прозрачного материала. Процесс включает в себя термоформовку или вакуумное формование. После формирования элайнеры подрезаются до нужного размера. Весь процесс занимает значительное время, требует больших усилий и влечёт за собой высокие расходы [16]. Кроме того, на текущий момент не до конца изучено влияние смол, применяемых в производстве 3D-моделей через термопластический процесс, на природу. Важно принимать во внимание различные аспекты, такие как потребление энергии, объёмы производимых отходов и степень загрязнения окружающей среды [17]. Одним из решений этой проблемы может стать использование переработанных материалов в 3D-принтерах для повышения экологичности технологии 3D-печати.

Одним из негативных результатов термопластического процесса является то, что в результате нагрева, используемого для формирования материала вокруг зубов, происходят значительные изменения в свойствах материала. J.H. Ryu и соавт. [38] изучили изменения в четырёх типах термоформовочных материалов после процесса термоформовки. Исследование показало, что термоформовка влияет на прозрачность более толстого материала, уменьшая её, а также повышает водопоглощение, растворимость в воде и может изменять твёрдость поверхности некоторых пластмасс. Отмечено, что процесс термоформовки уменьшает толщину элайнеров по сравнению с исходными размерами термопластичной фольги [20]. Механические свойства термопластичного материала, используемого для производства прозрачных элайнеров, играют решающую роль в достижении желаемых клинических результатов при сложных ортодонтических перемещениях, наряду с такими аспектами, как равномерность толщины элайнеров и геометрия [39]. Было замечено, что прозрачные элайнеры, изготовленные методом термоформовки, могут иметь разную толщину — от 0,5 до 1,5 мм, что влияет на их свойства и клиническую эффективность при перемещении зубов за счёт давления на поверхность. Однородность толщины элайнера важна относительно величины прилагаемых усилий: различия в толщине влияют на точность и адаптацию к зубам. Механические свойства используемого пластикового полимера, частота ежедневного снятия и степень активации зубов в наибольшей степени влияют на создаваемые силы [40].

Другие исследования показали, что элайнеры, изготовленные из термопластика, реагируют на внутриротовую среду во время их использования. Температура тела, влажность в полости рта и ферменты слюнных желёз оказывают существенное влияние на элайнер, изменяя его первоначальный размер и механические свойства [41]. Отмечено, что после хранения в искусственной слюне модуль упругости и предел текучести при растяжении изменялись, что в целом снижало механические свойства исследованных полимеров [39].

В работе [42] оценивали *in vitro* после 14 дней воздействия цитотоксичность первичных фибробластов на дёсны человека из четырёх термопластичных материалов: Duran (Scheu-Dental GmbH, Германия); Biolon (Dreve Dentamid GmbH, Германия); Zendura (Bay Materials LLC, США); SmartTrack (Align Technology, США). Термоформованные материалы продемонстрировали более высокую цитотоксичность из-за выделения мономеров при повышении температуры в процессе термопластики. Альтернативой являются прозрачные элайнеры, напечатанные на 3D-принтере с использованием специальных смол [43].

Y. Cai и соавт. отметили, что система коррекции зубов с помощью прозрачных элайнеров имеет свою собственную биомеханику, отличающуюся от традиционной ортодонтии. Ортодонтические силы, создаваемые технологией

коррекции зубов с помощью прозрачных элайнеров, в основном возникают в результате упругой деформации элайнера [44].

J.P. Gomez и соавт. подтвердили предположение о том, что композитные крепления помогают создать систему сил, которая имитирует естественное движение исследуемого зуба (когда сегмент элайнера смещается дистально без креплений, на зубе возникает момент силы, направленный по часовой стрелке, и дистальный наклон). Авторы установили, что наличие композитных креплений помогает противодействовать этому наклону, создавая встречный момент силы, который в свою очередь способствует естественному движению клыка. Величина этого противодействующего момента зависит от величины смещения, оказываемого на сегмент элайнера, и создаётся сложной системой сил, которая включает в себя силы, воздействующие на активные поверхности прикреплений. В поддержку этой концепции на активной поверхности прикреплений были обнаружены зоны сжатия (мезиальный аспект десневого прикреплению и дистальный аспект резцового прикреплению) [45].

3D-печать позволяет изготавливать детали послойно вместо обычных методов производства, основанных на механической обработке, формовании и субтрактивных методах [46]. Современные материалы, используемые для 3D-печати в ортодонтии, включают акрилонитрил-бутадиен-стирол, материалы для стереолитографии (эпоксидные смолы), полимолочную кислоту, полиамид (нейлон), полиамид со стекловолокном, серебро, сталь, титан, фотополимеры, воск и поликарбонат [47]. Использование прозрачного выравнивающего устройства, напечатанного на 3D-принтере для непосредственного применения, может устранить совокупные ошибки, возникающие при аналоговой регистрации оттисков и последующем термопластическом процессе [48]. Прямая печать даёт и другие преимущества, такие как более короткие цепочки поставок, значительно более короткие сроки выполнения заказа и более низкие затраты. Это также более экологичный процесс, при котором образуется значительно меньше отходов, чем при субтрактивных и термоформовочных процессах [49].

Существует ряд зарегистрированных патентов, описывающих процесс изготовления элайнеров прямой печатью и из материалов для 3D-печати [50]. P. Jindal и соавт. также сообщили, что прозрачная смола Dental LT (Formlabs, США) сопоставима с термопластичными материалами Duran и Durasoft (Scheu-Dental GmbH, Германия) при механическом воздействии нелинейных сил сжатия, эквивалентных циклам прикуса человека [51]; это означает, что элайнеры, изготовленные с помощью 3D-печати прямым методом, обладают достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать внешние нагрузки без снижения клинических показателей.

Смола Dental LT является одобренным биосовместимым материалом класса IIa с высокой устойчивостью к разрушению и идеально подходит для гнатологических

шин, зубных ретейнеров и других жёстких ортодонтических приспособлений, напечатанных напрямую, в качестве функциональных [27].

3D-печать представляет собой сложный метод контроля толщины зубных элайнеров и, следовательно, прилагаемой силы. A. Edelmann и соавт. сообщали об увеличении общей толщины элайнера по сравнению с соответствующим файлом дизайнера, особенно при использовании прозрачных смол Dental LT [52]. Отклонение от точности размеров напечатанных элайнеров может привести к нежелательному смещению зубов. M.C. McCarty и соавт. показали, что на общую точность размеров 3D-печатных элайнеров можно повлиять на первых этапах печати, например при отверждении биосовместимых смол [53]. P. Jindal и соавт. установили: влияние условий постобработки на механические характеристики напечатанных элайнеров показало, что время и температура чрезвычайно важны для устойчивости напечатанной смолы к нагрузкам на сжатие [54]. Правильный процесс постобработки необходим для обеспечения достаточной прочности и биосовместимости конечного продукта 3D-печати. Дополнительное поперечное сшивание полимера в конечном итоге улучшает механические свойства напечатанного материала и снижает остаточное напряжение.

Аддитивные процессы, в отличие от субтрактивных, предполагают послойное создание деталей из жидкой фотополимерной смолы для получения твёрдого полимера. Внутренним свойством 3D-нанесения слоёв является механическая анизотропия; на механические свойства напечатанных деталей влияют изменения окружающей среды, время после отверждения и изменения в ванне. S. Aravind Shanmugasundaram и соавт. проанализировали механическую анизотропию при аддитивном производстве методом стереолитографии. Показано, что напечатанные детали, которые можно классифицировать как изотропные, имеют большое преимущество перед другими, характеризуются более высокой точностью и клиническими характеристиками [55].

Материалы для 3D-печати очень токсичны до собственно 3D-печати, но токсичность постепенно снижается после полимеризации. Постполимеризация и обработка необходимы для снижения уровня токсичности, как рекомендовано производителями материалов для 3D-печати. S.F. Ahamed и соавт. провели исследование жизнеспособности клеток *in vitro*. Установлено, что материал Invisalign является более биосовместимым по сравнению с материалами для прямой печати элайнеров [56]. Существует множество прозрачных смол, используемых для 3D-печати приборов в стоматологии, но ни одна прозрачная смола не предназначена для прозрачных элайнеров с 3D-печатью. Прозрачная смола E-Ortholign заявлена как биосовместимый, стабильный по размерам, гибкий и прочный материал для прямой 3D-печати [19]. В настоящее время не существует одобренной для продажи фотополимеризующейся смолы, подходящей для прямой

печати прозрачных зубных элайнеров, но интерес к области ортодонтии растёт, особенно в связи с разработкой сертифицированных биосовместимых смол [28].

При 3D-печати используется полимерный материал, который обладает достаточными физическими, механическими, оптическими и биологическими свойствами для изготовления элайнеров. В настоящее время это Tera Harz TC-85, разработанный компанией Graphy Inc. (Республика Корея). Это алифатический виниловый эфир-уретановый полимер с метакрилатной функционализацией, обладающий памятью формы [57]. Кроме того, на сегодняшний день наиболее популярными являются материалы на основе винилацетата: Duran (Scheu-Dental GmbH, Германия); Bioplast (Scheu-Dental GmbH, Германия). Выбор этих материалов обусловлен оптимальным соотношением цены и качества, а также максимальным функционалом. Последующая подготовка напечатанного материала для элайнеров включает в себя такие процедуры, как очистка от неотверждённой остаточной смолы, удаление опоры и отверждение после производства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный метод лечения патологического прикуса с помощью элайнеров позволяет не только добиться исправления патологии, но и выполнить ортодонтическое лечение комфортно для пациента. В обзоре рассмотрены материалы, применяемые для создания конструкции элайнеров, а также методы моделирования и технологии, например 3D-печать. У элайнеров есть ряд недостатков в связи с ограниченными показаниями для их применения и высокой ценой, но также у них имеются большие перспективы в будущем из-за простоты и практичности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Barone S, Paoli A, Razionale AV, Savignano R. Modelling strategies for the advanced design of polymeric orthodontic aligners. In: Fred A, Gamboa H, editors. *Biomedical Engineering Systems and Technologies. BIOSTEC 2016. Communications in Computer and Information Science*. Springer; Cham. doi: 10.1007/978-3-319-54717-6\_5
2. Barone S, Paoli A, Razionale AV, Savignano R. Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners. *Int J Numer Method Biomed Eng*. 2017;33(8):e2839. doi: 10.1002/cnm.2839
3. Degtev IA, Kazumyan SV, Bilalova FA, et al. Materials for aligner thermoforming. *International Research Journal*. 2021;4-2. doi: 10.23670/IRJ.2021.106.4.048 EDN: WMCPYZ
4. Rosvall MD, Fields HW, Ziuchkovski J, et al. Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Ortho*. 2009;135(3):276–277. doi: 10.1016/j.ajodo.2008.09.020
5. Zinelis S, Eliades T, Eliades G, et al. Comparative assessment of the roughness, hardness, and wear resistance of aesthetic bracket materials. *Dent Mater*. 2005;21:890–894. doi: 10.1016/j.dental.2005.03.007 EDN: KICDUB

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Источник финансирования.** Отсутствует.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов (личных, профессиональных или финансовых), связанных с третьими лицами (коммерческими, некоммерческими, частными), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи, а также иных отношений, деятельности и интересов за последние три года, о которых необходимо сообщить.

**Участие авторов.** С.А. Демьяненко — курация, написание и редактирование статьи; А.Л. Морозов, Я.Ю. Пенькова — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста статьи. Все авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы и гарантировали, что вопросы, связанные с точностью или добросовестностью любой части работы, будут должным образом рассмотрены и решены.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Funding source.** None.

**Disclosure of interests.** The authors have no relationships, activities or interests (personal, professional or financial) with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the manuscript, as well as other relationships, activities or interests for the last three years that needed to disclose.

**Authors' contribution.** S.A. Demyanenko — curation, writing and editing of the article; A.L. Morozov, Ya.Yu. Penkova — literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text of the article. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

6. Dobrin RJ, Kamel IL, Musich DR. Load-deformation characteristics of polycarbonate orthodontic brackets. *Am J Orthod*. 1975;67:24–33. doi: 10.1016/0002-9416(75)90126-8
7. Kaur S, Singh R, Soni S, et al. Esthetic orthodontic appliances — A review. *Ann Geriatr Educ Med Sci*. 2008;5:11–14.
8. Leonardi R. Cone-beam computed tomography and three-dimensional orthodontics. Where we are and future perspectives. *J Orthod*. 2019;46:45–48. doi: 10.1177/1465312519840029
9. Tokarevich IV, Kipkaeva LV, Goralcheva TV, et al. *Innovations in orthodontics: textbook*. Minsk: BSMU; 2022. 100 p. (In Russ.)
10. Yassir YA, Nabbat SA, McIntyre GT, Bearn DR. Clinical effectiveness of clear aligner treatment compared to fixed appliance treatment: an overview of systematic reviews. *Clin Oral Invest*. 2022;26(3):2353–2370. doi: 10.1007/s00784-021-04361-1 EDN: PAVGWR
11. Upadhyay M, Arqub SA. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles. *J World Fed Orthod*. 2022;11(1):12–21. doi: 10.1016/j.ejwf.2021.11.002 EDN: FWDNKW
12. Boyd RL, Miller RJ, Vlaskalic V. The invisalign system in adult orthodontics: mild crowding and space closure cases. *J Clin Orthod*. 2000;34:203–212.

13. Ganjali NT. Bracket technique or eliners. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2014;4(4):370–378. (In Russ.) EDN: SDYRXJ
14. Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, et al. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. *Materials (Basel)*. 2021;14(7):1799. doi: 10.3390/ma14071799 EDN: ZEVWDL
15. Maspero C, Giannini L, Riva R, et al. Nasal cycle evaluation in 10 young patients: Rhynomanometric analysis. *Mondo Ortod*. 2009;34:263–268. doi: 10.1016/j.mor.2008.11.001
16. Abate A, Cavagnetto D, Fama A, et al. Efficacy of operculectomy in the treatment of 145 cases with unerupted second molars: a retrospective case–control study. *Dent J*. 2020;8:65. doi: 10.3390/dj8030065 EDN: CCAMOR
17. Maspero C, Fama A, Cavagnetto D, et al. Treatment of dental dilacerations. *J Biol Regul Homeost Agents*. 2019;33:1623–1627.
18. Martorelli M, Gerbino S, Giudice M, Ausiello P. A comparison between customized clear and removable orthodontic appliances manufactured using RP and CNC techniques. *Dent Mater*. 2013;29:e1–e10. doi: 10.1016/j.dental.2012.10.011
19. Khosravani MR, Reinicke T. On the environmental impacts of 3D printing technology. *Appl Mater Today*. 2020;20:100689. doi: 10.1016/j.apmt.2020.100689 EDN: HZECDE
20. Zinelis S, Panayi N, Polychronis G, et al. Comparative analysis of mechanical properties of orthodontic aligners produced by different contemporary 3D printers. *Orthod Craniofac Res*. 2022;25(3):336–341. doi: 10.1111/ocr.12537 EDN: KLBUDK
21. Bucci R, Rongo R, Levatè C, et al. Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10 days of intraoral exposure: a prospective clinical study. *Prog Orthod*. 2019;20(1):36. doi: 10.1186/s40510-019-0289-6 EDN: BJUPAH
22. Hahn W, Dathe H, Fialka-Fricke J, et al. Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2009;136(1):12.e1–13. doi: 10.1016/j.ajodo.2008.12.015
23. Ihssen BA, Kerberger R, Rauch N, et al. Impact of dental model height on thermoformed PET-G aligner thickness — an in vitro micro-CT study. *Appl Sci*. 2021;21(11):6674. doi: 10.3390/app11156674 EDN: LDCOPN
24. Kenning KB, Risinger DC, English JD, et al. Evaluation of the dimensional accuracy of thermoformed appliances taken from 3D printed models with varied shell thicknesses: An in vitro study. *Int Orthod*. 2021;19(1):137–146. doi: 10.1016/j.ortho.2021.01.005 EDN: KYVQGZ
25. Ivanova VA, Borisov VV, Platonova VV, Danshina SD. High accuracy of designs when using 3d printing in implantology (review of literature). *Challenges in Modern Medicine*. 2020;43(1):93–101. doi: 10.18413/2687-0940-2020-43-1-93-101 EDN: HMPNSR
26. Shtana VS, Ryzhova IP. Review of modern materials in orthopedic stomatology. *Actual Problems of Medicine*. 2019;42(1):55–66.
27. Maspero C, Tartaglia GM. 3D printing of clear orthodontic aligners: where we are and where we are going. *Materials*. 2020;13(22):5204. doi: 10.3390/ma13225204 EDN: PMROHF
28. Nakano H, Kato R, Kakami C, et al. Development of biocompatible resins for 3D printing of direct aligners. *J Photopolym Sci Tec*. 2019;32(2):209–216. doi: 10.2494/photopolymer.32.209
29. Zinelis S, Panayi N, Polychronis G, et al. Comparative analysis of mechanical properties of orthodontic aligners produced by different contemporary 3D printers. *Orthod Craniofac Res*. 2022;25(3):336–341. doi: 10.1111/ocr.12537
30. Kharitonov DY, Domashevskaya EP, Azarova EA, Goloschapov DL. The comparison of morphological and structural characteristics of the human mandibular bone tissue and the osteoplastic material “Bioplast-Dent”. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014;7(10):1389–1394. EDN: TCGKHP
31. Wiranto MG, Engelbrecht WP, Tutein Nolthenius HE, et al. Validity, reliability, and reproducibility of linear measurements on digital models obtained from intraoral and cone-beam computed tomography scans of alginate impressions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2013;143(1):140–147. doi: 10.1016/j.ajodo.2012.06.018
32. Christopoulou I, Kaklamanos EG, Makrygiannakis MA, et al. Patient-reported experiences and preferences with intraoral scanners: a systematic review. *Eur J Orthod*. 2022;44(1):56–65. doi: 10.1093/ejo/cjab027 EDN: ABACRX
33. Groth C, Kravitz ND, Jones PE, et al. Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod*. 2014;48:475–485.
34. Piedra-Cascón W, Krishnamurthy VR, Att W, Revilla-León M. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *J Dent*. 2021;109:103630. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103630 EDN: ISRCTC
35. Ercoli F, Tepedino M, Parziale V, Luzi C. A comparative study of two different clear aligner systems. *Prog Orthod*. 2014;15:31. doi: 10.1186/s40510-014-0031-3 EDN: VAXOEG
36. Pithon MM. A modified thermoplastic retainer. *Prog Orthod*. 2012;13:195–199. doi: 10.1016/j.pio.2012.01.001
37. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J*. 2017;62(Suppl. 1):58–62. doi: 10.1111/adj.12480
38. Ryu JH, Kwon JS, Jiang HB, et al. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. *Korean J Orthod*. 2018;48:316–325. doi: 10.4041/kjod.2018.48.5.316
39. Tamburrino F, D'Anto V, Bucci R, et al. Mechanical properties of thermoplastic polymers for aligner manufacturing: in vitro study. *Dent J*. 2020;8:47. doi: 10.3390/dj8020047 EDN: YPTFRL
40. Skaik A, Wei XL, Abusamak I, Iddi I. Effects of time and clear aligner removal frequency on the force delivered by different polyethylene terephthalate glycol-modified materials determined with thin-film pressure sensors. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2019;155:98–107. doi: 10.1016/j.ajodo.2018.03.017
41. Gerard Bradley T, Teske L, Eliades G, et al. Do the mechanical and chemical properties of Invisalign TM appliances change after use? A retrieval analysis. *Eur J Orthod*. 2015;38:27–31.
42. Martina S, Rongo R, Bucci R, et al. In vitro cytotoxicity of different thermoplastic materials for clear aligners. *Angle Orthod*. 2019;89:942–945. doi: 10.2319/091718-674.1
43. Shivapuja P, inventor. *Direct 3D-printed orthodontic aligners with torque, rotation, and full control anchors*. United States patent US 10179035. 2019 January 15.
44. Cai Y, Yang X, He B, Yao J. Finite element method analysis of the periodontal ligament in mandibular canine movement with transparent tooth correction treatment. *BMC Oral Health*. 2015;15:106. doi: 10.1186/s12903-015-0091-x EDN: LIXRWW
45. Gomez JP, Peña FM, Martínez V, et al. Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod*. 2015;85(3):454–460. doi: 10.2319/050714-330.1
46. Prasad S, Kader NA, Sujath G, Raj T. 3D printing in dentistry. *J 3D Print Med*. 2018;2:89–91. doi: 10.2217/3dp-2018-0012

- 47.** Nguyen T, Jackson T. 3D technologies for precision in orthodontics. *Semin Orthod*. 2018;24:386–392. doi: 10.1053/j.sodo.2018.10.003
- 48.** Jindal P, Juneja M, Siena FL, et al. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019;156:694–701. doi: 10.1016/j.ajodo.2019.05.012
- 49.** Peeters B, Kiratli N, Semeijn J. A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective. *J Clean Prod*. 2019;241:118313. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118313
- 50.** Mohnish Kumar S. *Cytotoxicity of 3D printed materials: an in vitro study*. Sri Ramakrishna Dental College and Hospital: Coimbatore; 2019.
- 51.** Jindal P, Worcester F, Siena FL, et al. Mechanical behavior of 3D printed vs thermoformed clear dental aligner materials under non-linear compressive loading using FEM. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020;112:104045. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104045 EDN: FLASFJ
- 52.** Edelmann A, English JD, Chen SJ, Kasper FK. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2020;158:e91–e98. doi: 10.1016/j.ajodo.2020.07.029 EDN: BGVFIR
- 53.** McCarty MC, Chen SJ, English JD, Kasper F. Effect of print orientation and duration of ultraviolet curing on the dimensional accuracy of a 3-dimensionally printed orthodontic clear aligner design. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2020;158:889–897. doi: 10.1016/j.ajodo.2020.03.023 EDN: UTBZBL
- 54.** Jindal P, Juneja M, Bajaj D, et al. Effects of post-curing conditions on mechanical properties of 3D printed clear dental aligners. *Rapid Prototyp J*. 2020;26:1337–1344. doi: 10.1108/rpj-04-2019-0118 EDN: GUGLNS
- 55.** Aravind Shanmugasundaram S, Razmi J, Mian MJ, Ladani L. Mechanical anisotropy and surface roughness in additively manufactured parts fabricated by stereolithography (SLA) using statistical analysis. *Materials*. 2020;13:2496. doi: 10.3390/ma13112496
- 56.** Ahamed SF, Kumar SM, Vijaya Kumar RK, et al. Cytotoxic evaluation of directly 3D printed aligners and Invisalign. *Eur J Mol*. 2020;7:1129–1140.
- 57.** Lee SY, Kim H, Kim HJ, et al. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Sci Rep*. 2022;12(1):6246. doi: 10.1038/s41598-022-09831-4 EDN: IHQSKG

## ОБ АВТОРАХ

### \* Пенькова Яна Юрьевна;

адрес: 295007, Россия, Симферополь, пр-кт Академика Вернадского, д. 4;  
ORCID: 0009-0007-7973-4689;  
e-mail: yanapenkova2003@mail.ru

### Демьяненко Светлана Александровна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-2743-498X;  
eLibrary SPIN: 9692-7083;  
e-mail: dc.kvalitet@gmail.com

### Морозов Андрей Леонидович;

ORCID: 0009-0007-7871-9081;  
eLibrary SPIN: 2737-5787;  
e-mail: moyar@list.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Yana Yu. Penkova, MD;

address: 4 Akademika Vernadskogo ave, Simferopol, Russia, 295007;  
ORCID: 0009-0007-7973-4689;  
e-mail: yanapenkova2003@mail.ru

### Svetlana A. Demyanenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-2743-498X;  
eLibrary SPIN: 9692-7083;  
e-mail: dc.kvalitet@gmail.com

### Andrei L. Morozov, MD;

ORCID: 0009-0007-7871-9081;  
eLibrary SPIN: 2737-5787;  
e-mail: moyar@list.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author