



ИНТЕГРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЦИФРОВУЮ СТОМАТОЛОГИЮ: ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ КАРКАСОВ КОРОНОК FRAMING CROWN

Клычев Аман

Аннотация

В статье представлено **Модульное дентальное решение (МДР)** — комплексная технология нового поколения, предназначенная для цифрового проектирования и производства зубных конструкций различной сложности. МДР объединяет физическую и цифровую системы, обеспечивая индивидуализацию, высокую точность, оптимизацию и автоматизацию процессов, а также возможность многократного использования данных без повторного сканирования.

Физическая часть МДР — **Модульная дентальная анатомическая система (МДАС)** — включает модуль каркаса, выполненный из титана или кобальт-хрома методом селективного лазерного сплавления (SLM), и внешний анатомический модуль, напечатанный из гибридного нанокерамического материала *Cerasmart* (GC) на компонентном 3D-принтере. Конструкция обеспечивает высокую прочность, износостойчивость, термоустойчивость, минимальное препарирование зуба и возможность установки даже при минимальном числе опорных зубов.

Цифровая часть — **Модульная дентальная цифровая система (МДЦС)** — включает веб-платформу для загрузки STL-сканов и управления заказами, а также систему искусственного интеллекта для автоматизированного проектирования модулей и подготовки файлов для печати. Обучение ИИ на одном типе конструкций повышает точность генерации моделей.

Представленная технология открывает новые возможности для клинической практики за счёт сокращения времени производства, повышения качества конструкций и упрощения повторного протезирования без повторной диагностики.

Ключевые слова: модульное дентальное решение, модульная дентальная анатомическая система, модульная дентальная цифровая система, 3D-печать, селективное лазерное сплавление, *Cerasmart*, гибридные материалы, микромеханические фиксаторы, цифровая стоматология, искусственный интеллект, PointNet++, 3D U-Net, автоматизированное проектирование,

стоматологическое протезирование, многократное использование цифровых моделей

Введение

Современная стоматология переживает этап активной цифровизации, что приводит к радикальным изменениям в подходах к проектированию и производству зубных конструкций. Использование аддитивного производства, систем автоматизированного проектирования и технологий искусственного интеллекта позволяет повысить точность, сократить сроки лечения, минимизировать инвазивность вмешательств и обеспечить индивидуализацию конструкций. Эти тенденции особенно важны при протезировании пациентов с частичной утратой зубов и сложной клинической ситуацией.

Традиционные методы требуют значительного препарирования твёрдых тканей зуба, сложного ручного моделирования и многоэтапного производства, что удлиняет сроки лечения и повышает его стоимость. Ограниченная возможность замены элементов конструкции без повторного сканирования пациента также создаёт дополнительные трудности в долгосрочной перспективе.

Для решения этих задач разработано **Модульное дентальное решение (МДР)** — комплексная технология нового поколения, которая сочетает физическую и цифровую системы для создания индивидуальных зубных конструкций различной сложности. МДР включает в себя **Модульную дентальную анатомическую систему (МДАС)** — физическую часть, состоящую из модуля каркаса и внешнего анатомического модуля, а также **Модульную дентальную цифровую систему (МДЦС)** — платформу для проектирования и управления данными с интеграцией искусственного интеллекта.

МДР обеспечивает минимальное препарирование зубов, высокую точность посадки модулей, сокращение времени изготовления и возможность многократного использования цифровых моделей без повторного сканирования. Представленная работа направлена на описание архитектуры МДР, применяемых материалов и методов производства, а также обсуждение преимуществ технологии для клинической практики.

Материалы и методы

Модульное дентальное решение (МДР) реализуется как интеграция физической и цифровой систем для создания индивидуальных зубных конструкций различной сложности.

Модульная дентальная анатомическая система (МДАС)

МДАС включает два основных модуля:

- **Модуль каркаса (МК)** — *Framing Crown module (US9,055,990 B1 New York, USA.)*, изготавливается методом селективного лазерного сплавления (SLM) из титана или кобальт-хрома. Каркас имеет минимальный вес, высокую прочность и оснащён микромеханическими фиксаторами для крепления внешнего анатомического модуля.
- **Внешний анатомический модуль (ВАМ)** — печатается на компонентном 3D-принтере из гибридного нанокерамического материала *Cerasmart (GC)*. Материал обеспечивает высокую прочность, износостойчивость, термоустойчивость и отличный эстетический результат. ВАМ обеспечивает возможность быстрой замены без демонтажа каркаса при износе.

Ключевые особенности МДАС:

- высокая износостойчивость и термоустойчивость конструкции;
- минимальный вес (в 2–3 раза меньше по сравнению с классическими технологиями благодаря конструкции и материалам);
- минимальное препарирование зуба;
- возможность установки и надёжной фиксации конструкции на минимальном числе опорных зубов (два жевательных зуба и один передний).

Модульная дентальная цифровая система (МДЦС)

МДЦС включает:

- **Веб-платформу** — для загрузки STL-сканов и клинической информации о пациенте, управления заказами, архивирования цифровых моделей и взаимодействия между клиниками и лабораториями.
- **Систему искусственного интеллекта (ИИ)** — модуль проектирования, реализованный как гибрид нейросетевых архитектур и классических алгоритмов процедурной генерации.

Применяемые модели и методы

Компонент	Описание	Функция в системе
PointNet++	Нейросетевая архитектура для облаков точек	Сегментация STL-сканов, выделение опорных зубов
3D U-Net	3D-сверточная нейросеть	Генерация анатомических форм модулей
DenseNet 3D	Сеть для уточнения границ	Повышение точности геометрии
Классические алгоритмы	Алгоритмы процедурной генерации	Детализация и подгонка формы
XGBoost (ML)	Машинное обучение	Предсказание зон нагрузки и контактов

Этапы работы ИИ

1. Очистка скана и нормализация геометрии
2. Сегментация и идентификация опорных зубов
3. Генерация каркаса с учётом биомеханики
4. Формирование внешнего анатомического модуля с учётом эстетики
5. Подготовка STL-файлов для печати
6. Архивация моделей для многократного использования

Преимущество

Обучение ИИ на одном типе конструкций (МДС) обеспечивает высокую точность генерации моделей и повторяемость результата.

Производственный процесс

1. Получение внутриворотного скана зуба или зубного ряда и формирование STL-файла
2. Загрузка данных на веб-платформу МДЦС
3. Автоматизированная генерация 3D-моделей МК и ВАМ с использованием ИИ
4. Печать МК методом SLM на промышленном 3D-принтере
5. Печать ВАМ на компонентном 3D-принтере
6. Постобработка и соединение модулей с помощью микромеханических фиксаторов

Результаты

В ходе разработки и тестирования **Модульного дентального решения (МДР)** были получены следующие результаты:

- Время полного производственного цикла (от загрузки скана до готовой конструкции) сокращено с 72 часов (при традиционном ручном моделировании) до 2–3 часов при использовании ИИ и цифровой платформы.
- Вес модульных конструкций оказался в 2–3 раза меньше по сравнению с классическими цельнолитыми коронками и мостовидными протезами за счёт архитектуры каркаса и применяемых материалов.
- Посадка модулей на модель зубного ряда обеспечивала точность прилегания в пределах 50–80 микрон без дополнительной механической подгонки.
- Внешний анатомический модуль продемонстрировал стабильность геометрии после многократной замены, что подтвердило возможность воспроизводства конструкции без необходимости повторного сканирования.
- Испытания на модельных жевательных нагрузках показали высокую устойчивость конструкции при симуляции жевательной силы до 600 Н.

- МДР успешно адаптирован для установки на минимальное число опорных зубов (два жевательных и один передний), при этом сохранялась стабильность и равномерность распределения нагрузки.

Обсуждение

Представленные результаты подтверждают эффективность предложенного **Модульного дентального решения (МДР)** как современной технологии для цифрового проектирования и производства индивидуальных зубных конструкций. МДР обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами изготовления коронок и мостовидных протезов.

Ключевыми особенностями МДР являются:

- **Высокая точность и повторяемость конструкции** за счёт использования системы искусственного интеллекта, обученной на одном типе модульных конструкций. Это позволяет минимизировать риски ошибок, связанных с ручным моделированием, и повысить качество посадки.
- **Сокращение времени производства:** внедрение цифровой платформы и ИИ позволило уменьшить сроки изготовления модулей до 2–3 часов по сравнению с традиционным циклом 72 часа и более.
- **Минимальное препарирование зубов:** конструкция каркаса и внешнего анатомического модуля требует значительного меньшего объёма обточки, что повышает комфорт пациента и сохраняет больше твёрдых тканей.
- **Меньший вес конструкции:** благодаря архитектуре каркаса и использованию титана или кобальт-хрома вес модулей в 2–3 раза меньше по сравнению с классическими протезами.
- **Гибкость в клиническом применении:** МДР может быть установлено даже при минимальном числе опорных зубов (два жевательных и один передний), что расширяет возможности лечения при сложных клинических случаях.
- **Удобство повторного протезирования:** за счёт цифрового хранения моделей возможно многократное воспроизводство внешнего анатомического модуля без необходимости повторного сканирования, что значительно упрощает замену изношенных элементов.

МДР демонстрирует перспективность для интеграции в существующие CAD/CAM-платформы и может быть дополнено возможностью автоматизированного анализа окклюзии и интеграцией с виртуальными моделями челюстно-лицевого аппарата.

Заключение

Модульное дентальное решение (МДР) представляет собой инновационную технологию следующего поколения, которая объединяет модульный принцип построения зубных конструкций, аддитивное производство и цифровую

платформу с интегрированным искусственным интеллектом. Технология обеспечивает персонализированный подход к протезированию, высокую точность проектирования и изготовления конструкций, оптимизацию и автоматизацию процессов, что делает МДР перспективным решением для современной стоматологии.

Ключевым преимуществом МДР является отсутствие необходимости владения специализированным программным обеспечением CAD/CAM. Для работы с системой врачу или лаборатории достаточно иметь доступ в интернет и возможность загрузки внутриротовых сканов. Веб-платформа и встроенная система искусственного интеллекта автоматически обрабатывают данные, генерируют 3D-модели модулей каркаса и внешнего анатомического модуля и подготавливают файлы для печати на совместимом оборудовании. Это значительно снижает порог вхождения для внедрения технологии в практику.

Благодаря архитектуре модулей и применяемым материалам конструкции обладают минимальным весом (в 2–3 раза легче классических протезов), высокой прочностью, износоустойчивостью и термоустойчивостью. МДР позволяет минимизировать объём препарирования зубов и обеспечивает возможность установки конструкции даже при минимальном числе опорных зубов.

Цифровая составляющая решения обеспечивает долговременное хранение данных и возможность многократного воспроизводства внешнего анатомического модуля без повторного сканирования, что существенно упрощает процесс повторного протезирования и экономит ресурсы врача и пациента.

Таким образом, МДР формирует новое поколение технологий для стоматологического протезирования, объединяя модульный подход, аддитивное производство и интеллектуальные цифровые сервисы, и открывает новые возможности для персонализированного, высокоточного и малотравматичного восстановления зубного ряда.

Литература

1. Кобяков А.С., Гладков Ю.А. Цифровая стоматология: современные технологии и перспективы // Стоматология. 2020. № 4. С. 20–25.
2. Ким Е. и др. Применение селективного лазерного плавления в стоматологии // Российский стоматологический журнал. 2019. Т. 23, № 2. С. 45–50.
3. Sun J., Zhang F., et al. Application of 3D printing technology for creating patient-specific dental crowns: a review // Journal of Prosthodontic Research. 2018. Vol. 62(3). P. 295–301.
4. Qi L., Yu H., et al. Artificial intelligence applications in prosthodontics: a scoping review // Journal of Prosthodontics. 2021. Vol. 30(5). P. 421–428.
5. Zhao X., Han Y., et al. Design and optimization of dental crowns using deep learning // Computers in Biology and Medicine. 2020. Vol. 127. P. 104073.

