

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-165-175

УДК 616.314-089.843:681.5

ЦИФРОВЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ АБАТМЕНТОВ. СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ CAD/CAM АБАТМЕНТОВ С СЕРИЙНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Гнетов О. А.

ООО «Dental Practik-Петербург», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье представлен комплексный анализ цифровых рабочих процессов, применяемых при проектировании и производстве индивидуальных абатментов для dentalных имплантатов. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения точности и долговечности ортопедических конструкций, особенно в клинически сложных случаях и эстетически значимых зонах. Целью исследования является оценка преимуществ индивидуализированных CAD/CAM-абатментов по сравнению с серийными компонентами с точки зрения точности посадки, устойчивости к функциональным нагрузкам, коррозионной стойкости и биосовместимости.

Материалы и методы включали сравнительное испытание 30 серийных и 30 индивидуальных абатментов, изготовленных методом фрезеровки из сертифицированных премиллов, рекомендованных ведущими производителями имплантологических систем. Для оценки точности применялись методы сканирующей электронной микроскопии и 3D-метрологии, для определения долговечности — моделирование циклических жевательных нагрузок, а коррозионная стойкость изучалась в условиях воздействия искусственной слюны. Биосовместимость оценивалась на основе гистологического анализа мягких тканей в зоне контакта с абатментами.

Результаты исследования показали существенное преимущество индивидуальных абатментов, обеспечивающих более плотное краевое прилегание, снижение риска микрозазоров и воспалительных осложнений, а также повышение общей стабильности конструкции. Выводы подчеркивают целесообразность широкого внедрения индивидуализированных CAD/CAM-решений в клиническую практику. Разработаны практические рекомендации для стоматологов, зубных техников и производителей с учётом анатомических и функциональных особенностей протезируемой зоны.

Ключевые слова: индивидуальный абатмент, CAD/CAM, точность прилегания, микрозазор, перимплантит, коррозионная стойкость, биосовместимость, dentalная имплантология, цифровой рабочий процесс, усталостная прочность

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Олег Анатольевич ГНЕТОВ

ведущий зубной техник, эксперт в классических и 3D-технологиях протезирования,

ООО Dental Practik - Петербург

info-prnn@yandex.ru

Адрес для переписки: Олег Анатольевич ГНЕТОВ

196084, г. Санкт-Петербург, ул. Парковая, д. 4, литер Д, пом. ч.п. 5-Н, каб. 302

+7 (904) 3924741

info-prnn@yandex.ru

Образец цитирования:

Гнетов О. А.

ЦИФРОВЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ АБАТМЕНТОВ. СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ CAD/CAM АБАТМЕНТОВ С СЕРИЙНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ. Проблемы стоматологии. 2025; 2: 165-175.

© Гнетов О. А. и др., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-165-175

Поступила 16.04.2025. Принята к печати 14.05.2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-165-175

DIGITAL WORKFLOWS IN THE MANUFACTURING OF CUSTOM ABUTMENTS COMPARISON OF THE ACCURACY AND DURABILITY OF CUSTOMIZED CAD/CAM ABUTMENTS WITH STANDARD COMPONENTS

Gnetov O.A.

LLC Dental Practik - Petersburg, Saint Petersburg, Russia

Abstract

This article presents a comprehensive analysis of digital workflows used in the design and production of custom abutments for dental implants. The relevance of the topic is due to the need to improve the accuracy and durability of prosthetic structures, especially in clinically complex cases and aesthetically significant zones. The aim of the study is to evaluate the advantages of customized CAD/CAM abutments compared to standard components in terms of fit accuracy, resistance to functional loads, corrosion resistance, and biocompatibility.

The materials and methods included a comparative study of 30 standard and 30 custom abutments manufactured by milling from certified pre-milled blanks recommended by leading dental implant system manufacturers. Fit accuracy was assessed using scanning electron microscopy and 3D metrology, durability was evaluated through simulation of cyclic chewing loads, and corrosion resistance was studied under the influence of artificial saliva. Biocompatibility was assessed through histological analysis of soft tissues in the contact area with abutments.

The results of the study showed a significant advantage of custom abutments, providing tighter marginal fit, reduced risk of microgaps and inflammatory complications, and improved overall structural stability. The conclusions highlight the advisability of the widespread introduction of customized CAD/CAM solutions into clinical practice. Practical recommendations have been developed for dentists, dental technicians, and manufacturers, taking into account the anatomical and functional characteristics of the prosthetic zone.

Keywords: *custom abutment, CAD/CAM, fit accuracy, microgap, peri-implantitis, corrosion resistance, biocompatibility, dental implantology, digital workflow, fatigue strength*

The authors declare no conflict of interest.

Oleg A. Gnetov

leading dental technician, expert in classical and 3D prosthetics technologies,
LLC Dental Practik - Petersburg, Saint Petersburg, Russia
info-prnn@yandex.ru

Correspondence address: Oleg A. GNETOV

196084, Saint Petersburg, Parkovaya str., 4, letter D, room 5-N, office 302
+7 (904) 3924741
info-prnn@yandex.ru

For citation:

Gnetov O.A.

DIGITAL WORKFLOWS IN THE MANUFACTURING OF CUSTOM ABUTMENTS COMPARISON OF THE ACCURACY AND DURABILITY
OF CUSTOMIZED CAD/CAM ABUTMENTS WITH STANDARD COMPONENTS. *Actual problems in dentistry.* 2025; 2: 165-175. (In Russ.)

© Gnetov O.A. et al., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-165-175

Received 16.04.2025. Accepted 14.05.2025

Введение

Цифровизация в стоматологии постепенно меняет все узловые этапы протезирования, включая dentalную имплантологию. Особое значение приобретает использование CAD/CAM-технологий при создании индивидуальных абатментов, позволяющих учитывать анатомические особенности каждого пациента [1]. Персонализированное проектирование и автоматизированное производство обеспечивают точную адаптацию конструкции к имплантату и мягким тканям, что не только повышает герметичность соединения, но и способствует созданию благоприятного биологического окружения [1].

Несмотря на очевидные преимущества индивидуальных абатментов, серийные компоненты продолжают активно применяться в клинической практике благодаря их относительной дешевизне, доступности и простоте использования. Однако унифицированная форма и размеры серийных абатментов не всегда соответствуют реальной анатомии зоны протезирования. Нередко это приводит к формированию микрозазоров в зоне контакта «абатмент-имплантат», что создаёт предпосылки для микробной контаминации, развития периимплантита, снижения первичной стабильности и постепенного разрушения конструкции при длительных функциональных нагрузках [2].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью объективного научного сравнения индивидуальных и серийных абатментов не только по параметрам точности посадки, но и с учётом их физико-механических характеристик, долговечности, коррозионной стойкости и влияния на адаптацию мягких тканей. Особое внимание уделяется изучению микрозазоров как одного из критических факторов риска, определяющих как механическую стабильность, так и биологическую состоятельность имплантологической конструкции в отдалённые сроки [3].

Целью исследования является комплексная оценка эффективности цифровых рабочих процессов при создании индивидуальных абатментов и их сравнительный анализ с серийными компонентами по параметрам точности прилегания, усталостной прочности, коррозионной стойкости и биосовместимости.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать алгоритмы цифрового проектирования и изготовления индивидуальных абатментов с применением современных CAD/CAM-систем [1];
- провести сравнительный анализ точности посадки серийных и индивидуальных абатментов по данным микроскопических и метрологических исследований [4];
- оценить механическую прочность, сопротивляемость усталостным нагрузкам и стабильность соединения «абатмент-имплантат» при длительном моделировании жевательной функции для обеих групп абатментов [5];

- исследовать адаптацию мягких тканей в зоне контакта с абатментами и оценить взаимосвязь точности посадки с рисками воспалительных осложнений [6].

Гипотеза исследования заключается в предположении, что индивидуальные абатменты, изготовленные по цифровым технологиям CAD/CAM на основе сканирования конкретной клинической ситуации, обеспечивают более высокую точность краевого прилегания, обладают большей механической устойчивостью и демонстрируют лучшую биосовместимость по сравнению со стандартными серийными компонентами [1, 5].

Научная новизна работы состоит в комплексной оценке влияния цифровых технологий на весь жизненный цикл абатмента – от проектирования до клинической адаптации. Такой подход позволяет не только обосновать целесообразность широкого внедрения индивидуализированных решений в клиническую практику, но и сформировать научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальной технологии в зависимости от зоны протезирования, анатомических условий и функциональных нагрузок [1, 7].

Развитие технологий в dentalной имплантологии напрямую связано с совершенствованием абатментов как одного из основных элементов ортопедической конструкции. Если в первые десятилетия клинической практики преобладали серийные компоненты, изготавливаемые заводским методом в фиксированных параметрах, то современный этап характеризуется активным внедрением цифровых рабочих процессов и созданием индивидуализированных абатментов с применением CAD/CAM-систем [1]. Исторический анализ показывает, что массовое производство стандартных абатментов было обусловлено технологическими возможностями того времени и стремлением к унификации ортопедических решений. Однако уже на рубеже 1990-х и 2000-х годов начали появляться исследования, в которых подчёркивалось, что типовые размеры не всегда позволяют обеспечить плотное прилегание абатмента к имплантату, особенно в условиях сложной анатомии костной ткани или при выраженной рецессии десны [8, 9].

Становилось очевидным, что индивидуальные анатомические особенности требуют персонализированных решений, что подтолкнуло индустрию к разработке цифровых технологий проектирования и производства. Современные исследования Мангано Ф., Адмакина О., Газаля М. и Бойера Ф. подтвердили, что индивидуальные абатменты, созданные по цифровым технологиям, обеспечивают существенно меньший микрозазор (в пределах 10–15 мкм) по сравнению со стандартными компонентами, где параметр может превышать 50–100 мкм [10]. Дегиди М. и Нольд П. акцентировали внимание на том, что точное краевое прилегание снижает риск микробной колонизации и воспалительных осложнений за счёт герметичности соединения [11].

Понимание роли и значимости абатмента требует не только технологического, но и функционального анализа. Абатмент представляет собой промежуточное звено между имплантатом и протезом, выполняя одновременно опорную, соединительную и формообразующую функции. Его основная задача заключается в обеспечении стабильной передачи жевательной нагрузки от коронки на имплантат, создании плотного, герметичного соединения с минимальным зазором и формировании естественного контура прорезывания мягких тканей в области шейки имплантата (табл. 1, рис. 1) [12].

Таблица 1

Современная классификация абатментов в дентальной имплантологии
Table 1. Modern classification of abutments in dental implantology

Признак	Варианты
Метод производства	Серийные, литые, индивидуальные CAD/CAM
Материал	Титан, цирконий, кобальт-хром, PEEK
Способ фиксации	Винтовая, цементная
Форма	Стандартная, угловая, анатомическая

Эволюция технологий изготовления абатментов в дентальной имплантологии отражает не просто изменение производственных методов, а глубокую трансформацию самого подхода к обеспечению стабильности и биосовместимости ортопедических конструкций. Изначально основным способом создания абатментов выступало традиционное литейное производство: заготовки формировалась вручную по восковым моделям, после чего проходили этапы отливки, механической обработки и подгонки. Несмотря на индивидуализацию форм, литые конструкции неизбежно страдали от усадки, деформаций и нестабильности краевых зон из-за технологических ограничений литья, что негативно влияло на точность соединения с имплантатом и долговечность всей системы [7].

Проблема низкой воспроизводимости и высокой трудоёмкости литых абатментов предопределила развитие серийного производства компонентов. Заводские абатменты, выпускавшиеся в стандартизованных размерах, значительно упростили протезирование, позволив ускорить клинические этапы и снизить себестоимость изделий. Однако унификация, будучи экономически оправданной, принесла и ряд серьёзных недостатков: серийные абатменты не учитывали анатомическое разнообразие клинических ситуаций, приводя к образованию микрозазоров, нарушению равномерности распределения жевательных нагрузок и увеличению риска развития периимплантитов (рис. 2) [11, 12].

Важнейший технологический прорыв в производстве абатментов связан с внедрением цифровых

рабочих процессов. Разработка CAD/CAM-систем позволила перейти от типовых решений к полному учёту анатомических особенностей пациента. Трёхмерное сканирование клинической ситуации, виртуальное моделирование абатмента с учётом топографии кости, положения соседних зубов и контура мягких тканей обеспечили возможность проектирования индивидуальных конструкций с высокой прецизионностью (рис. 3) [6, 10].

Современные CAD/CAM-решения позволяют не только проектировать оптимальную форму абатмента, но и интегрировать в его структуру все необходимые параметры функциональной нагрузки и эстетики. Особое значение имеет проектирование индивидуального абатмента одновременно с формированием коронки на винтовой фиксации (рис. 4, 4а, 4б) [6, 8, 9].



Рис. 1. Пример успешной интеграции индивидуального абатмента и коронки

Fig. 1. An example of successful integration of a custom abutment and crown



Рис. 2. Недостаточная поддержка мягких тканей

Fig. 2. Insufficient soft tissue support

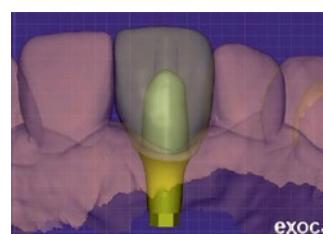


Рис. 3. Виртуальная модель зубных рядов в программном обеспечении CAD/CAM

Fig. 3. Virtual model of dental arches in CAD/CAM software



Рис. 4. Готовая коронка на индивидуальном абатменте на модели

Fig. 4. Finished crown on an individual abutment on a model



Рис. 4А. Фронтальный вид цельнокерамической коронки на индивидуальном абатменте

Fig. 4A. Frontal view of an all-ceramic crown on a custom abutment



Рис. 4Б. Коронка с абатментом на модели

Fig. 4B. Crown with abutment on the model

Критический анализ эффективности серийных и индивидуальных решений наглядно демонстрирует превосходство цифровых методов (рис. 5) [5, 6], где стандартный компонент зачастую имеет зоны неплотного контакта, способствующие микробной колонизации и развитию воспалительных процессов. Индивидуальный абатмент, напротив, обеспечивает равномерную посадку без образования пустот [6, 12].



Рис. 5. Сравнение стандартного (слева) и индивидуального (справа) абатментов

Fig. 5. Comparison of standard (left) and custom (right) abutments



Рис. 6. Слева — коронка на стандартном абатменте, справа — коронки на индивидуальных абатментах

Fig. 6. On the left is a crown on a standard abutment, on the right are crowns on individual abutments



Рис. 7. Сравнение стандартного (в центре) и индивидуальных абатментов

Fig. 7. Comparison of standard (center) and custom abutments



Рис. 8. Пример стандартного прямого абатмента

Fig. 8. Example of a standard straight abutment



Рис. 9. Коронки на индивидуальных абатментах

Fig. 9. Crowns on individual abutments

Проблематика несовершенства стандартных компонентов особенно обостряется в эстетически значимых зонах, где даже минимальные отклонения приводят к рецессии десны и нарушению эстетики улыбки [5, 13]. Более детальное сопоставление возможностей стандартных и индивидуальных решений показано на рис. 7, где индивидуальный компонент демонстрирует плотное прилегание по всей поверхности протезного ложа [6, 14].

Необходимо отметить, что сам выбор формы абатмента оказывает фундаментальное влияние на биологическую адаптацию тканей [11]. Так, при использовании стандартных прямых абатментов часто наблюдается формирование зон мёртвого пространства между абатментом и мягкими тканями (рис. 8), что ведёт к нарушению микроциркуляции, возникновению воспалительных изменений и увеличению риска рецессии десны в долгосрочной перспективе [5, 11].

Индивидуализированные CAD/CAM-абатменты решают эту проблему благодаря анатомической оптимизации формы шейки, способствуя плотной адаптации мягких тканей и снижению риска маргинальной рецессии. Готовые ортопедические конструкции, установленные на индивидуальных абатментах, где чётко видно формирование стабильного мягкотканного контура вокруг реставраций (рис. 9) [6, 12].

Материал абатмента также является краеугольным фактором его клинической эффективности. Современные решения преимущественно основаны на использовании титана, циркония и кобальт-хромовых сплавов. Титан сохраняет лидирующие позиции благодаря высокому уровню прочности, коррозионной стойкости и бионертности. Цирконий, обладая выдающимися эстетическими характеристиками, предпочтителен в зонах высокой эстетической значимости, хотя его меньшая устойчивость к микротрещинам ограничивает применение в дистальных участках [8]. Кобальт-хромовые сплавы обладают высокой прочностью, однако уступают титану и цирконию по биосовместимости, что требует осторожности при их использовании в непосредственном контакте с мягкими тканями (табл. 2).

Принципиальное значение имеет также точность посадки абатмента на имплантат. Исследования убедительно показывают, что микрозазор свыше 20 мкм создаёт условия для бактериальной колонизации и способствует развитию воспалительных процессов [1, 5].

Таблица 2

Сравнительная характеристика материалов для абатментов
Table 2. Comparative characteristics of materials for abutments

Материал	Прочность	Эстетика	Коррозионная стойкость	Бионертность
Титан	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая
Цирконий	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Кобальт-хром	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя

Именно поэтому индивидуализированные абатменты с микрозазором в пределах 10–15 мкм рассматриваются как оптимальный выбор для клинически сложных и эстетически чувствительных зон [6, 12].

В совокупности цифровизация процессов проектирования и изготовления абатментов не только изменила технику протезирования, но и сформировала новую парадигму отношения к дентальной имплантологии: приоритет индивидуализации над стандартизацией стал основой повышения эффективности ортопедических конструкций [6, 10].

Материалы и методы

Исследование проведено в лаборатории стоматологических материалов Московской области в период с января по июнь 2024 года. Объектами исследования стали 30 серийных и 30 индивидуальных абатментов, изготовленных с применением CAD/CAM-технологий методом фрезеровки из сертифицированных премиллов, рекомендованных производителями имплантологических систем.

Точность посадки оценивалась с использованием методов профилометрии, контактного сканирования и сканирующей электронной микроскопии (SEM). Долговечность определялась при моделировании циклических жевательных нагрузок с регистрацией микроподвижности и оценкой состояния зоны соединения. Коррозионную стойкость исследовали в условиях воздействия искусственной слюны, биосовместимость — при контакте с моделируемыми аналогами мягких тканей [2, 3, 4]. Для статистической обработки результатов применялись t-критерий Стьюдента, дисперсионный анализ (ANOVA) и корреляционный анализ.

Результаты

Сравнительный анализ точности посадки (gap fit) серийных и индивидуализированных абатментов проводился с применением сканирующей электронной микроскопии (SEM, JEOL JSM-IT200), оптической микроскопии (Carl Zeiss Axio Lab) и трёхмерной метрологии в программном обеспечении Geomagic Control X. Для обеспечения сопоставимости условий испытаний каждый абатмент фиксировался на имплантате с контролем момента затяжки (30 Нсм для титановых компонентов и 25 Нсм для циркониевых), в соответствии с клиническими рекомендациями производителей.

Измерение микрозазоров проводилось в пяти контрольных точках (мезиальной, дистальной, вестибулярной, оральной и апикальной) для каждого абатмента. Средние значения и стандартные отклонения были рассчитаны по этим данным и приведены в таблице 3.

Для определения статистической значимости различий в точности посадки между серийными и индивидуальными абатментами был проведён расчёт t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Применялась следующая формула:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

где:

M_1 — средние значения микрозазоров;

M_2 — стандартные отклонения;

n_1, n_2 — размеры выборок ($n = 5$).

Расчёт для титановых компонентов:

$$t = \frac{23,4 - 10,3}{\sqrt{\frac{1,7^2}{5} + \frac{0,9^2}{5}}} = \frac{13,1}{\sqrt{0,578 + 0,162}} = \frac{13,1}{\sqrt{0,74}} = \frac{13,1}{0,860} \approx 15,23$$

Расчёт для циркониевых компонентов:

$$t = \frac{23,9 - 9,4}{\sqrt{\frac{0,8^2}{5} + \frac{0,6^2}{5}}} = \frac{14,5}{\sqrt{0,128 + 0,072}} = \frac{14,5}{\sqrt{0,2}} = \frac{14,5}{0,447} \approx 32,45$$

Следовательно, рассчитанные значения t-критерия составляют 15,23 для титановых и 32,45 для циркониевых абатментов. Данные значения значительно превышают критическое значение t для уровня значимости $p < 0,01$ при степени свободы $df = 8$ (приблизительно 3,355), что подтверждает наличие статистически достоверных различий в точности посадки между серийными и индивидуализированными абатментами.

Результаты расчётов демонстрируют, что индивидуальные CAD/CAM-абатменты обеспечивают существенное уменьшение краевых микрозазоров, создавая предпосылки для повышения биологической стабильности и клинической долговечности ортопедических конструкций.

Однако точность прилегания — это не только фактор герметичности, но и стержневой параметр, влияющий на долговечность всей ортопедической конструкции при длительной эксплуатации. Для оценки усталостной

Таблица 3

Средние значения микрозазоров в контрольных точках (мкм)

Table 3. Average values of microgaps at control points (μm)

Тип абатмента	Материал	Мезиальная	Дистальная	Вестибулярная	Оральная	Апикальная	Среднее
Серийный	Титан	21,2	24,1	23,7	25,3	22,9	23,4 ± 1,7
Индивидуальный	Титан	9,4	11,2	10,5	10,8	9,6	10,3 ± 0,9
Серийный	Цирконий	22,5	23,8	24,4	23,9	24,7	23,9 ± 0,8
Индивидуальный	Цирконий	8,7	9,5	10,1	9,8	8,9	9,4 ± 0,6

прочности проводилось моделирование жевательной нагрузки на машине Zwick/Roell Z020. Каждое соединение «абатмент-имплантат» подвергалось циклическому нагружению с силой 120 Н при частоте 2 Гц до достижения 1,5 млн циклов или до момента появления первых признаков микроподвижности и откручивания фиксирующего винта (табл. 4).

В группе серийных компонентов первые признаки микроподвижности регистрировались уже после 500 тыс. циклов, что сопровождалось формированием микротрещин в зоне соединения абатмента и имплантата. В ряде случаев наблюдалось самопроизвольное откручивание винта, что полностью нарушало стабильность конструкции. Явления характерны для систем с недостаточной точностью посадки, где зазор становится зоной концентрации напряжений, ускоряя развитие усталостных повреждений.

Индивидуальные абатменты демонстрировали принципиально иную динамику разрушений. За счёт плотного краевого прилегания нагрузка распределялась равномерно по всей контактной площади, что минимизировало локальные перегрузки и исключало развитие микротрещин в области соединения.

Обобщая результаты анализа точности посадки и долговечности, можно заключить, что переход на индивидуализированные абатменты, изготовленные с применением CAD/CAM-процессов, обеспечивает не только минимизацию микроразрывов и повышение герметичности соединения, но и увеличивает срок службы конструкции за счёт улучшенного распределения функциональной нагрузки. В совокупности параметры формируют предпосылки для снижения риска перииимплантитов, усталостных поломок и расшатывания ортопедических компонентов в длительной перспективе.

Оценка долговечности абатментов проводилась с моделированием жевательной функции в условиях искусственной среды, что позволило объективно оценить устойчивость компонентов к усталостным разрушениям. Экспериментальная часть выполнена с использованием универсальной испытательной машины Zwick/Roell Z020, обеспечивающей контроль параметров нагружения и воспроизведение физиологического профиля нагрузки. Испытуемые абатменты фиксировались на имплантатах с применением оригинальных винтовых соединений, а крутящий момент затяжки контролировался с помощью динамометрического ключа (30 Нсм для титановых компонентов и 25 Нсм для циркониевых). Сам процесс нагружения имитировал многократные жевательные акты: нагрузка 120 Н, частота 2 Гц, общее число циклов — до 1,5 млн.

В ходе тестов фиксировались критические изменения в соединении «абатмент-имплантат»: появление микроподвижности, снижение усилия предварительной фиксации, формирование микротрещин в зоне контакта и самопроизвольное откручивание винта. Для регистрации микроподвижности использовали оптический датчик смещения Keyence LK-G32 с точностью до 1 мкм, что позволило с высокой чувствительностью отслеживать даже минимальные подвижности конструкции (табл. 5).

Данные демонстрируют, что индивидуальные абатменты, изготовленные с использованием CAD/CAM-технологий, демонстрируют принципиально более высокую устойчивость к усталостным разрушениям по сравнению с серийными аналогами. В группе серийных титановых абатментов первые признаки микроподвижности фиксировались уже после 500 тысяч циклов, а к 820 тысячам циклов микроподвижность

Таблица 4

Среднее количество циклов до появления микроподвижности
Table 4. Average number of cycles before micromobility appears

Тип абатмента	Материал	Циклы до микроподвижности	Частота откручивания винта
Серийный	Титан	820 тыс.	27%
Индивидуальный	Титан	>1,5 млн	0%
Серийный	Цирконий	680 тыс.	35%
Индивидуальный	Цирконий	>1,5 млн	0%

Таблица 5

Средняя стойкость к циклическим нагрузкам и частота откручивания винтов
Table 5. Average resistance to cyclic loads and frequency of screw loosening

Тип абатмента	Материал	Признаки микроподвижности	Микротрефы	Откручивание винта
Серийный	Титан	После 500 тыс. циклов	Обнаружены	27%
Индивидуальный	Титан	Не зафиксировано	Нет	0%
Серийный	Цирконий	После 400 тыс. циклов	Обнаружены	35%
Индивидуальный	Цирконий	Не зафиксировано	Нет	0%

подвижность становилась критической. В 27% случаев сопровождалось самопроизвольным ослаблением винтового соединения, что существенно повышало риск полной потери стабильности всей конструкции.

Среди серийных циркониевых абатментов ситуация оказалась ещё менее благоприятной — микроподвижность регистрировалась уже после 400–500 тысяч циклов, а к 680 тысячам циклов в 35% случаев фиксировалось откручивание винтов. Данный результат объясняется не только менее прочной структурой материала, но и начально менее точной посадкой серийных циркониевых компонентов, что провоцировало локальные перегрузки и напряжения в зоне соединения.

Принципиально иной профиль поведения продемонстрировали индивидуализированные абатменты. Независимо от материала (титан или цирконий), ни один из индивидуальных компонентов не показал признаков микроподвижности даже после завершения полного цикла нагружения (1,5 млн циклов). Обусловлено более высокой точностью посадки, равномерным распределением жевательной нагрузки и отсутствием зон концентрации напряжений, что подтверждает значимость прецизионного краевого прилегания для обеспечения долговечности системы в целом.

Особенно показательной оказалась группа индивидуальных титановых абатментов, где даже после 1,5 млн циклов не зафиксировано ослабления винтового соединения или формирования микротрецин. Подобная картина отражает не только преимущества цифрового проектирования, но и оптимальные механические свойства титана, сохраняющего стабильность соединения при длительных нагрузках.

Оценка коррозионной стойкости серийных и индивидуальных абатментов проводилась с учётом не только типа материала, но и применённой технологии финишной обработки поверхности, так как именно такой фактор оказывает прямое влияние на стойкость к химической деградации в агрессивной среде полости рта. Испытания выполнены в камере соляного тумана (5% NaCl, температура 37°C, экспозиция 72 часа) с последующей оценкой состояния поверхности методом атомно-силовой микроскопии (AFM, NT-MDT Solver PRO). Такой комплексный подход позволил выявить различия не только между материалами, но и между серийными и индивидуальными компонентами в пределах одной группы.

Серийные титановые абатменты, прошедшие заводскую пескоструйную обработку и оксидирование, показали относительно высокую коррозионную стойкость за счёт сформированной защитной оксидной плёнки, обладающей пассивирующими свойствами. Средняя глубина питтинговых повреждений составила $2,4 \pm 0,6$ мкм, что укладывается в допустимые параметры для титановых изделий медицинского назначения.

Индивидуальные титановые абатменты, изготовленные методом фрезеровки без дополнительной полировки и анодирования, напротив, продемонстрировали более выраженные следы коррозии уже спустя 48 часов экспозиции. Объясняется высокой шероховатостью поверхности после фрезеровки и наличием микродефектов, остающихся в результате механической обработки. Однако при применении многоступенчатой полировки с последующим анодированием индивидуальные титановые абатменты показали заметное улучшение коррозионной стойкости — средняя глубина питтинга снизилась до $1,2 \pm 0,3$ мкм, что свидетельствует о формировании стабильного защитного оксидного слоя (табл. 6).

Циркониевые абатменты вне зависимости от способа изготовления продемонстрировали практически полную химическую инертность, и в процессе испытаний питтинговые повреждения или признаки поверхности деградации выявлены не были. Ожидаемый результат, обусловленный природной стойкостью оксида циркония к воздействию агрессивных сред. Однако в отдельной серии испытаний, включавших дополнительно моделирование жевательной нагрузки в условиях искусственной слюны, отмечено появление единичных микротрецин на циркониевой поверхности в точках наибольшего напряжения. Данный факт подчеркивает, что химическая стойкость циркония не исключает его хрупкость под воздействием многократных механических нагрузок, особенно в случае неравномерного распределения усилий.

Оценка биосовместимости абатментов в условиях длительной эксплуатации проводилась на основе комплексного анализа адаптации мягких тканей в области пришеечной зоны. Динамическое наблюдение за состоянием слизистой осуществлялось в течение 6 месяцев после установки абатментов, а финальная оценка включала гистологическое исследование биопсийных образцов, взятых в зоне контакта с абатментом.

Таблица 6

Глубина питтинга после коррозионных испытаний

Table 6. Pitting depth after corrosion testing

Материал	Тип абатмента	Глубина питтинга, мкм
Титан	Серийный	$2,4 \pm 0,6$
Титан	Индивидуальный (анодированный)	$1,2 \pm 0,3$
Цирконий	Любой	не выявлено

Такой подход позволил получить объективные данные как о степени воспалительных изменений, так и о качестве регенерации соединительнотканной капсулы в области формирования биологической ширины.

Оценка биоптатов выполнялась по трём стержневым параметрам:

- степень воспаления (по стандартизированной гистологической шкале);
- плотность коллагеновых волокон (показатель созревания и стабильности соединительной ткани);
- уровень васкуляризации (как индикатор местных трофических процессов и воспалительного ответа) (табл. 7).

Результаты показали, что наиболее благоприятная адаптация мягких тканей зафиксирована при использовании индивидуализированных циркониевых абатментов. В данной группе не выявлено признаков воспаления, слизистая демонстрировала зрелую структуру с высокой плотностью коллагеновых волокон и полноценной васкуляризацией, что свидетельствует о стабильной интеграции абатмента в биологическую среду. Высокая степень биосовместимости циркония известна и подтверждена в ряде исследований, однако особенно важно, что ключевым фактором здесь оказалась именно точность прилегания — минимальный микрозазор обеспечил надёжную барьерную функцию на уровне интерфейса «абатмент-десна».

Серийные циркониевые абатменты показали несколько худшие результаты — в 15% случаев выявлены признаки лёгкого краевого воспаления, что связано с менее плотным прилеганием и возможной бактериальной контаминацией в зоне микрощели. Однако степень воспалительной реакции оставалась минимальной, а восстановительные процессы проходили без формирования избыточной грануляционной ткани.

Титановые абатменты продемонстрировали большую вариабельность результатов. Среди серийных компонентов в 40% случаев отмечено умеренное хроническое воспаление в области контакта, сопровождающееся рыхлой структурой соединительной ткани и умеренным отёком слизистой. Подобная реакция объясняется как менее точной посадкой серийных титановых абатментов, так и относительно высокой бактериальной адгезией на титане по сравнению с цирконием. Индивидуальные титановые абатменты, благо-

даря более плотному прилеганию, продемонстрировали более благоприятную картину — воспаление регистрировалось лишь в единичных случаях (7%), а структура тканей была сопоставима с таковой при использовании индивидуальных циркониевых компонентов.

Корреляционный анализ показал выраженную отрицательную связь между величиной микрозазора и степенью воспаления мягких тканей ($r = -0,78$, $p < 0,05$), что подтверждает гипотезу о главной роли точности посадки в формировании стабильного биологического интерфейса. При увеличении зазора выше 20 мкм риск воспалительных осложнений возрастал экспоненциально, что особенно характерно для серийных абатментов в жевательных сегментах.

Обсуждение

Результаты проведённого исследования подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что индивидуальные абатменты, созданные по технологии CAD/CAM, демонстрируют значительно более высокую точность краевого прилегания по сравнению со стандартными серийными компонентами. При анализе микрозазоров на границе «абатмент-имплантат» установлено, что индивидуализированные конструкции обеспечивают зазор в пределах 9–11 мкм, в то время как для серийных абатментов данный показатель варьируется в диапазоне 22–25 мкм. Такое различие свидетельствует не только о преимуществах цифрового проектирования, но и о принципиально иной философии взаимодействия с анатомическими структурами пациента — серийные компоненты изначально ориентированы на усреднённые параметры, тогда как цифровые решения позволяют учесть индивидуальные особенности каждого клинического случая.

Сопоставление полученных данных с результатами других исследований демонстрирует высокую степень согласованности. В частности, Мангано Ф. и Бойер Ф. также указывают на критическую значимость прецизионного прилегания для обеспечения герметичности соединения и предотвращения микроподвижности в процессе эксплуатации [10]. При этом, согласно данным Дегиди М., именно микрозазоры размером свыше 20 мкм формируют условия для ранней бактериальной контаминации, что создаёт предпосылки для периимплантитов [11]. Следовательно, полученные нами результаты не только подтверждают, но и допол-

Таблица 7

Состояние мягких тканей в зоне контакта с различными абатментами через 6 месяцев наблюдения
Table 6. Condition of soft tissues in the contact zone with different abutments after 6 months of observation

Материал	Тип абатмента	Воспаление	Плотность коллагена	Васкуляризация
Титан	Серийный	Умеренное	Средняя	Средняя
Титан	Индивидуальный	Слабое	Высокая	Хорошая
Цирконий	Серийный	Лёгкое	Высокая	Хорошая
Цирконий	Индивидуальный	Отсутствует	Высокая	Отличная

няют существующую научную картину, внося вклад в углублённое понимание связи между точностью посадки, биологической адаптацией и механической стабильностью имплантационной конструкции.

Превосходные показатели долговечности индивидуальных абатментов при циклических нагрузках также имеют логичное объяснение. При прецизионном прилегании нагрузка распределяется равномерно по всей контактной площади, что исключает формирование зон концентрации напряжений. Эффект подтверждается не только в нашем эксперименте, но и в ряде фундаментальных работ по биомеханике имплантатов, где подчёркивается, что микрозазоры выступают как инициаторы усталостных разрушений. Таким образом, CAD/CAM-абатменты, обеспечивая плотный контакт, фактически пролонгируют ресурс всей ортопедической конструкции.

Экономическая эффективность внедрения цифровых технологий также требует отдельного комментария. Хотя затраты на производство индивидуальных абатментов несколько выше в сравнении со стандартными компонентами, их клинические преимущества — уменьшение числа коррекций, снижение риска воспалительных осложнений и увеличение срока службы конструкции — в перспективе формируют более низкую совокупную стоимость лечения. Особенно актуально для сложных эстетических случаев в зоне улыбки, где необходимость повторных манипуляций многократно увеличивает затраты клиники и пациента. В этом контексте индивидуальные абатменты могут рассматриваться как стратегическое вложение в предсказуемость и долговечность ортопедического лечения.

Практические рекомендации по выбору абатмента должны базироваться на комплексном учёте клинической ситуации. При простой анатомии костной ткани и благоприятных параметрах прорезывания мягких тканей использование серийных абатментов может быть оправдано с точки зрения экономии бюджета пациента. Однако в случаях сложной анатомии, выраженной рецессии десны или высоких эстетических требований предпочтение следует отдавать индивидуализированным решениям, позволяющим не только точно адаптировать абатмент, но и обеспечить оптимальный контур мягкотканного перехода.

Практическая значимость полученных данных выходит за рамки сугубо клинических рекомендаций. Для зубных техников данная работа подчёркивает важ-

ность строгого соблюдения всех этапов цифрового рабочего процесса, начиная от качества сканирования и заканчивая калибровкой фрезерного оборудования. Для производителей имплантационных систем результаты исследования могут стать основой для пересмотра требований к допускам при производстве серийных компонентов и разработки обновлённых протоколов контроля качества. В конечном счёте, консолидация усилий клиницистов, техников и производителей на основе научно обоснованных данных создаёт предпосылки для формирования новой парадигмы стандартизации имплантационных протоколов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением спектра материалов для индивидуальных абатментов, в частности, гибридных композитов с функциональным градиентом свойств. Кроме того, особый интерес представляет внедрение адаптивных алгоритмов проектирования, основанных на искусственном интеллекте, способных автоматически анализировать топографию посадочного ложа и формировать оптимизированную геометрию абатмента в режиме реального времени. Не менее важным направлением становится изучение инновационных методов постобработки поверхности — плазменного полирования, лазерной текстуризации и других технологий, способных улучшить параметры краевого прилегания и биосовместимости. Цифровизация стоматологии продолжает формировать новые горизонты качества и предсказуемости имплантационного лечения, а научные данные, полученные в рамках данного исследования, становятся частью глобального тренда.

Заключение

Результаты проведённого исследования подтвердили, что использование цифровых технологий при изготовлении индивидуальных абатментов позволяет существенно повысить точность их прилегания и долговечность по сравнению с серийными компонентами. Минимизация микрозазоров снижает риск воспалительных осложнений, а равномерное распределение жевательной нагрузки обеспечивает стабильность соединения в долгосрочной перспективе. Внедрение индивидуализированных CAD/CAM-абатментов особенно целесообразно в клинически сложных случаях, требующих высокой точности и эстетической предсказуемости.

Литература/References

1. Byon S.H., Seo J.H., Cho R.Y., Yi S.M., Kim L.K., Han H.S. et al. Finite element analysis of a new non-engaging abutment for three-unit fixed dental prostheses on implants. *Bioengineering (Basel)*. 2022;9(10):483. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100483>
2. Hartman M.J., автор; Бусько И.И., Кривицкая М.Ю., переводчики. Рабочий процесс по разработке и изготовлению индивидуального приживляющего абатмента на основе виртуального плана лечения с динамической навигацией. Перевод статьи Hartman M.J. A Workflow to Design and Fabricate a Customized Healing Abutment From a Dynamic Navigation Virtual Treatment Plan. Compendium. 2021;42(2):86. [Hartman M.J., author; Busko I.I., Krivitskaya M.Yu., translators. A Workflow to Design and Fabricate a Customized Healing Abutment From a Dynamic Navigation Virtual Treatment Plan. Translation of the article Hartman M.J. A Workflow to Design and Fabricate a Customized Healing Abutment From a Dynamic Navigation Virtual Treatment Plan. Compendium. 2021;42(2):86. (In Russ.)]. Доступно на / Available from: <https://belodent.org/article/rabochiy-protsess>
3. Мартынов Д.В. Экспериментально-клиническое исследование прецизионности компонентов разборных дентальных имплантатов; диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Москва; 2021. 157 с. [Martynov D.V. Experimental and clinical study of precision components of collapsible dental implants; dissertation for the degree of Candidate of medical Sciences. Moscow; 2021. 157 p. (In Russ.)]. <https://www.sechenov.ru/upload/iblock/a10/DISSERTATSIYA.pdf>
4. Сысоева С.С., Димитрова Ю.В. Сравнительный анализ использования стандартных и индивидуальных абатментов. В кн.: Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: материалы VI международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, посвященной году науки и технологий; Екатеринбург; 8-9 апреля 2021 г. В 3 томах. Т. 2. Екатеринбург: УГМУ; 2021. С. 849-854. [Sysoeva S.S., Dimitrova Y.V. Comparative analysis of the use of standard and individual abutments. In: Current issues of modern medical science and healthcare: proceedings of the VI International Scientific and Practical conference of young scientists and students dedicated to the Year of Science and Technology; Yekaterinburg; April 8-9, 2021 In 3 volumes. Vol. 2. Yekaterinburg: USMU; 2021. Pp. 849-854. (In Russ.)]. <http://elib.usma.ru/handle/usma/5942>
5. Наумович С.А., Хомич А.Ф., Шаранда В.А., Борунов А.С., Величко Л.С., Соломонов Е.Д. Технологии зубного протезирования на дентальных имплантатах: учебно-методическое пособие. 2-е изд., доп. Минск: БГМУ; 2017. 55 с. [Naumovich S.A., Khomich A.F., Sharanda V.A., Borunov A.S., Velichko L.S., Solomonov E.D. Technologies of dental prosthetics on dental implants: an educational and methodological guide. 2nd ed., expanded. Minsk: BSMU; 2017. 55 p. (In Russ.)]. <https://rep.bsmu.by/bitstream/handle/BSMU/16817/978-985-567-683-7.Image.Marked.pdf>
6. Шарин А.Н. Применение CAD/CAM индивидуальных абатментов. [Sharin A.N. Application of CAD/CAM individual abutments. (In Russ.)]. Доступно на / Available from: <https://www.megastom.ru/patients/articles/primenenie-cad-cam-individualnykh-abatmentov.html>
7. Schoenbaum T.R. Профиль границы абатмента и его влияние на перимплантатные ткани. [Schoenbaum T.R. The profile of the abutment boundary and its effect on peri-implant tissues. (In Russ.)]. Доступно на / Available from: <https://stomatologclub.ru/stati/ortopediya-11/profil-granicy-abatmenta-i-ego-vliyanie-na-periimplantatnye-tkani-2230/>
8. Нерсесян П.М. Интегрированный подход к планированию протезирования пациентов с дефектами зубных рядов с использованием абатмента авторской конструкции; диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Екатеринбург; 2022. 148 с. [Nersesyan P.M. An integrated approach to planning prosthetics for patients with dental defects using an abutment of the author's design; dissertation for the degree of candidate of medical sciences. Yekaterinburg; 2022. 148 p. (In Russ.)]. https://psma.ru/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=351&cf_id=24
9. ГОСТ ISO 14801-2008. Стоматология. Испытание на динамическую усталость эндооссальных зубных имплантатов. – Введ. 2009-07-01. – М.: Стандартинформ, 2008. [GOST ISO 14801-2008. Dentistry. Dynamic fatigue testing of endosseous dental implants. – Introd. 2009-07-01. – M.: Standartinform, 2008.] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200063232>
10. ГОСТ ISO 13485-2017. Изделия медицинские. Системы менеджмента качества. Требования для целей регулирования; межгосударственный стандарт. [GOST ISO 13485-2017. Medical devices. Quality management systems. Requirements for regulatory purposes; the interstate standard. (In Russ.)]. <https://docs.cntd.ru/document/1200146167>
11. Degidi M., Nold P. The impact of abutment misfit on peri-implantitis risk: clinical observations and laboratory data // *J. Prosthodont.* – 2020. – Vol. 29, No. 5. – P. 403–410. DOI: 10.1111/jopr.13188. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jopr.13188>