На правах рукописи

Шарганов Абдул-Латиф Фарук

Научное обоснование выбора толщины слоя 3D-печати навигационных хирургических шаблонов для дентальной имплантации

3.1.7. - Стоматология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки Российской Федерации, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор **Лосев Федор Федорович**
Официальные оппоненты:

Олесова Валентина Николаевна - заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой стоматологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Государственный научный центр «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» Федерального медико - биологического агентства России.

Панин Андрей Михайлович - доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой пропедевтики хирургической стоматологии стоматологического факультета научно-образовательного института стоматологии им. А. И. Евдокимова Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения высшего образования «Российский университет медицины» Министерства Здравоохранения Российской Федерации

Ведущая организация:
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства Здравоохранения Российской Федерации
Защита состоится 24 декабря 2026 г. в 10-00 часов на заседании Диссертационного совета (21.1.079.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации по адресу: 119021, Москва, ул. Тимура Фрунзе, д. 16 (конференц-зал).
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.cniis.ru Федерального государственного бюджетного учреждения Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Автореферат разослан: «23» ноября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат медицинских наук Гусева Ирина Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современный этап развития дентальной имплантологии характеризуется неуклонным переходом к концепции ортопедически ориентированного планирования, где ключевую роль играют цифровые протоколы. Их внедрение позволяет существенно повысить прогнозируемость лечения и минимизировать риски, особенно в сложных клинических ситуациях (D. Clark и соавт., 2017; M.S. Block и соавт., 2017). Главным связующим звеном между виртуальным планированием и его реализацией в операционной являются навигационные хирургические шаблоны. Доказано, что их применение позволяет свести к минимуму отклонения между запланированным и фактическим положением дентального имплантата (М.А. Чугурян и И.В. Степанов, 2022; A. Tahmaseb и соавт., 2018).

Развитие аддитивных технологий, в частности стереолитографической (SLA) 3D-печати, сделало изготовление таких шаблонов более доступным, быстрым и точным. Однако, несмотря на широкое распространение технологии, в профессиональном сообществе остаются дискуссионными вопросы оптимизации ключевых технологических параметров печати (R. D’haese и соавт., 2022; M. Revilla-León и M. Özcan, 2022). Одним из критических факторов является выбор толщины слоя печати, который напрямую влияет как на технологическую стабильность процесса, так и на конечные свойства изделия.

Печать с толщиной слоя 0,05 мм, хотя и обеспечивает теоретически более высокую точность и гладкость поверхности (A. Seidel и соавт., 2023), предъявляет значительно более жесткие требования к оборудованию и его калибровке. Это повышает нагрузку на экструдер и механику оси Z, увеличивает риск термомеханической дестабилизации из-за перегрева и, как следствие, может приводить к деформации тонкостенных структур. Многие промышленные принтеры официально не поддерживают данный режим из-за риска снижения качества изготовления. В свою очередь, печать с толщиной слоя 0,1 мм обеспечивает термокинетический баланс и стабильность процесса, гарантируя прогнозируемое качество изделий при меньших требованиях к оборудованию и значительном сокращении времени изготовления.

Не менее важным аспектом является обеспечение биобезопасности. Хирургические шаблоны контактируют с поврежденными тканями, что делает их стерилизацию обязательной. Наиболее распространенный метод — автоклавирование — сопряжен с воздействием высоких температур и давления, что может негативно влиять на физико-механические характеристики фотополимерных материалов и их пространственную стабильность (N. Gandarilla и соавт., 2025; B. Labakoum и соавт., 2024). В научной литературе данные о влиянии термической обработки на современные биосовместимые материалы, особенно отечественного производства, остаются фрагментарными и редко становятся предметом комплексного исследования.

Таким образом, необходимость поиска научно обоснованного компромисса между выбором оптимальных параметров 3D-печати, точностью изготовления и сохранением прочностных характеристик навигационных шаблонов после обязательной стерилизации определяет актуальность данного исследования. Изучение данных факторов позволит оптимизировать цифровые протоколы имплантации, повысить эффективность и безопасность стоматологической помощи.

Степень разработанности темы исследования

В современной литературе достаточно широко освещены общие вопросы применения цифровых технологий и аддитивного производства в стоматологии (D. G. Kim и соавт., 2023; T. Joda и соавт., 2023). Многочисленные исследования посвящены сравнительной точности статической и динамической навигации, а также клинической эффективности использования хирургических шаблонов при различных видах имплантации (L.V. Stefanelli и соавт., 2019; D. Wu и соавт., 2020). Детально изучены факторы, влияющие на точность позиционирования имплантатов, такие как тип опоры шаблона и методика проведения операции (J. D'haese и соавт., 2012; M. Vercruyssen и соавт., 2023).

Значительное число публикаций посвящено точности изготовления шаблонов с использованием различных технологий (SLA, DLP) и материалов (F. Mangano и соавт., 2022; M. Revilla-León и соавт., 2023). Однако большинство из них анализируют конечную точность позиционирования дентальных имплантатов, не углубляясь в инженерные аспекты влияния конкретных параметров печати, таких как толщина слоя, на физико-механические свойства самого шаблона.

Особенно малоизученным остается вопрос влияния толщины слоя на воспроизводимость критически важных элементов шаблона, таких как направляющие отверстия (D. Lan и соавт., 2024). Также недостаточно данных о поведении фотополимерных материалов, особенно отечественных, при прохождении обязательного этапа стерилизации автоклавированием. Имеющиеся работы часто носят разрозненный характер и не предлагают единых протоколов выбора параметров печати в зависимости от клинической задачи (A. Unkovskiy и соавт., 2023).

Таким образом, несмотря на высокую актуальность проблемы, в доступной литературе отсутствуют комплексные исследования, объединяющие оценку влияния толщины слоя 3D-печати на физико-механические свойства, точность воспроизведения геометрии и стабильность этих характеристик после стерилизации, что определяет научную новизну и цель настоящего исследования.

Цель исследования

Научное обоснование выбора оптимальной толщины слоя стереолитографической 3D-печати навигационных хирургических шаблонов и оценка физико-механических характеристик после их стерилизации автоклавированием.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ физико-механических характеристик образцов из фотополимерных материалов с различной толщиной слоя 3D-печати после их стерилизации автоклавированием.
2. Определить влияние толщины слоя стереолитографической 3D-печати на физико-механические характеристики навигационного хирургического шаблона из отечественного фотополимерного материала.
3. Провести сравнительный анализ влияния двух режимов стерилизации автоклавированием на физико-механические характеристики и микроструктуру образцов из фотополимерного материала, изготовленных с различной толщиной слоя 3D-печати.
4. Провести сравнительную оценку воспроизводимости навигационных шаблонов из фотополимерного материала при различной толщине слоя 3D-печати.
5. Разработать практические рекомендации по применению стереолитографической 3D-печати навигационных шаблонов и их стерилизации для обеспечения биобезопасности и точности дентальной имплантации.

Научная новизна исследования

Настоящее исследование вносит следующий вклад в развитие методов цифрового протоколирования в дентальной имплантологии — все положения новизны опираются на полученные в ходе работы данные.

Впервые проведена комплексная сравнительная оценка влияния толщины слоя стереолитографической 3D-печати (0,1 мм и 0,05 мм) на физико-механические характеристики навигационных хирургических шаблонов, изготовленных из отечественного фотополимерного материала «Dental Yellow Clear PRO». Установлено, что уменьшение толщины слоя 3D-печати с 0,1 мм до 0,05 мм обеспечивает статистически значимое повышение прочности и модуля упругости при изгибе готовых изделий, что позволяет достичь более высокой механической надежности шаблонов при сохранении их геометрической точности.

Впервые проведен сравнительный анализ влияния режимов стерилизации автоклавированием (134°C и 121°C) на физико-механические характеристики и микроструктуру лабораторных образцов, изготовленных из фотополимерного материала с разной толщиной слоя 3D-печати, и установлены различия в характере поверхностных изменений в зависимости от режима автоклавирования. Показано, что оба режима сохраняют макроскопическую целостность материала, однако режим 121°C оказывает более щадящее воздействие на микроструктуру.

Впервые установлен дифференцированный характер влияния толщины слоя 3D-печати на воспроизводимость различных геометрических параметров навигационных шаблонов. Показано, что уменьшение толщины слоя до 0,05 мм обеспечивает максимальную

стабильность диаметров направляющих отверстий, что является критически важным для прецизионности позиционирования имплантатов, в то время как основные каркасные геометрические характеристики (протяженность дуги, высота, толщина стенки) воспроизводятся с высокой точностью в обоих исследуемых режимах 3D-печати.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении научных представлений о влиянии параметров аддитивного производства на физико-механические и геометрические характеристики медицинских изделий. В работе доказана стабильность физико-механических характеристик отечественного фотополимера «Dental Yellow Clear PRO» при воздействии высоких температур и давления в процессе стерилизации автоклавированием. Полученные данные углубляют понимание процессов, происходящих в полимерной матрице на микроуровне при различных режимах термической обработки, и их влияния на конечные свойства изделий.

Практическая значимость исследования состоит в разработке и внедрении оптимизированного цифрового протокола изготовления навигационных шаблонов, позволяющего при более доступных и технологически стабильных параметрах 3D-печати изготавливать шаблоны без потери клинически значимой точности в стандартных клинических ситуациях. Предложены четкие критерии выбора толщины слоя печати: режим 0,05 мм рекомендован для сложных случаев (имплантация в эстетически значимой зоне, близость важных анатомических структур), тогда как режим 0,1 мм может быть рекомендован для стандартных ситуаций. Обоснована безопасность применения режима автоклавирования для шаблонов, изготовленных из исследуемого материала, что позволяет соблюдать санитарно-эпидемиологические нормы без риска деформации изделия и существенной потери его прочности. Результаты исследования могут быть использованы в учебном процессе на кафедрах стоматологии ортопедической и стоматологии хирургической, а также в практике зуботехнических лабораторий, специализирующихся на CAD/CAM технологиях.

Методология и методы исследования

Методологическую основу исследования составляет комплексный подход, предполагающий сочетание лабораторных физико-механических испытаний, метрологического анализа и статистических методов обработки данных для оценки влияния параметров 3D-печати на качество навигационных шаблонов. Методология исследования включает: изготовление лабораторных образцов и навигационных шаблонов на стереолитографическом 3D-принтере «Elegoo Saturn 12K ULTRA» из отечественного фотополимера «Dental Yellow Clear PRO» с двумя значениями толщины слоя (0,1 мм и 0,05 мм); испытания на трехточечный изгиб образцов и шаблонов на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z010 в соответствии с ГОСТ Р 56924-2016; оценку микроструктуры методом растровой электронной микроскопии (FE-SEM) на микроскопе Hitachi Regulus8230; метрологический анализ геометри-

ческих параметров шаблонов (диаметры и высота направляющих отверстий, протяженность дуги, высота и толщина стенки) с использованием цифровых измерительных инструментов. Статистическая обработка данных (расчет средних значений, стандартных отклонений, доверительных интервалов, t-критерий Стьюдента) проведена с использованием специализированного программного обеспечения. Уровень статистической значимости принят $p < 0,05$.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Толщина слоя 3D-печати оказывает дифференцированное влияние на точность и воспроизводимость навигационных хирургических шаблонов. Использование слоя 3D-печати 0,05 мм обеспечивает максимальную прецизионность диаметров направляющих отверстий, в то время как увеличение слоя до 0,1 мм сохраняет стабильность общих геометрических параметров навигационного шаблона (высота, толщина стенки, протяженность дуги) на клинически приемлемом уровне.

2. Увеличение толщины слоя 3D-печати с 0,05 мм до 0,1 мм приводит к статистически значимому снижению прочностных характеристик автоклавированных образцов: прочность при изгибе уменьшается на 26%, модуль упругости — на 30%, что определяет необходимость выбора режима печати исходя из требуемой механической надежности конструкции.

3. Стандартная процедура стерилизации автоклавированием в режимах 121°C и 134°C не вызывает критической деструкции фотополимерного материала, однако режим 121°C является более щадящим для его микроструктуры. Применение автоклавирования в качестве финального этапа подготовки шаблонов является безопасным и обеспечивает их биосовместимость без клинически значимого снижения функциональных свойств.

Степень достоверности и апробация полученных результатов

Достоверность проведенного исследования определяется достаточным объемом выборок для каждой экспериментальной группы ($n=10$), использованием современных, сертифицированных методов лабораторных испытаний (испытательная машина Zwick/Roell Z010, растровый электронный микроскоп Hitachi Regulus8230, калиброванные измерительные инструменты) и соблюдением стандартизированных протоколов (ГОСТ Р 56924-2016). Уровень статистической значимости $p<0,05$. Полученный массив данных был статистически обработан для обеспечения достоверности и объективности выводов.

Материалы диссертации были представлены на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы стоматологии» в ФГБУ ДПО «Центральная государственная медицинская академия» Управления делами Президента Российской Федерации 15.04.2026. Апробация диссертации проведена на совместном заседании сотрудников отдела дентальной имплантологии, отдела хирургиче-

ской стоматологии и пародонтологии, отдела ортопедической стоматологии и гнатологии, отделения челюстно-лицевой хирургии, центра лучевой диагностики ФГБУ НМИЦ «ЦНИИС и ЧЛХ» Минздрава России 11.06.2026 г.

Внедрение результатов исследования

Результаты диссертационной работы внедрены в клиническую практику отдела дентальной имплантологии, отдела хирургической стоматологии и пародонтологии, отдела ортопедической стоматологии и гнатологии, отделения челюстно-лицевой хирургии ФГБУ НМИЦ «ЦНИИС и ЧЛХ» Минздрава РФ. Полученные в ходе исследования данные используются в обучении врачей-ординаторов и аспирантов, а также в системе непрерывного медицинского образования при подготовке и повышении квалификации врачей стоматологов-хирургов и стоматологов-ортопедов.

Личный вклад автора

Автором определены цель и задачи исследования, разработан дизайн лабораторного исследования, а также сформированы критерии формирования экспериментальных групп. Проведён анализ современных отечественных и зарубежных источников литературы по проблеме применения аддитивных технологий в дентальной имплантации, на основании которого обоснован выбор направлений исследования, применяемого фотополимерного материала и параметров 3D-печати. Автор самостоятельно проводил лабораторные испытания (изготовление образцов, их стерилизацию, механические испытания) и последующий анализ физико-механических характеристик, а также метрологическую оценку точности навигационных шаблонов с применением современных методов исследования. Текст диссертационной работы, включая разделы, посвящённые результатам исследования, обсуждению полученных данных и обобщающим выводам, написан автором лично.

Публикации

По материалам исследования опубликовано 4 печатные работы, из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа изложена на 117 страницах компьютерного текста, состоит из введения, 4 глав, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и списка литературы. Список литературы содержит 113 источников, из них 5 отечественных и 108 иностранных авторов. Диссертационная работа иллюстрирована 18 рисунками и 12 таблицами.

Материалы и методы исследования

Современная дентальная имплантология предъявляет высокие требования к точности позиционирования имплантатов, что напрямую влияет на долгосрочную стабильность и эстетику ортопедических конструкций. Ключевую роль в реализации ортопедически ориентированного планирования играют навигационные хирургические шаблоны, изготовленные методом 3D-печати. Однако точность и механическая надежность шаблонов зависят от множества технологических параметров, среди которых важнейшим является толщина слоя стереолитографической печати. Дискуссионным остается вопрос о влиянии данного параметра на физико-механические свойства изделий, а также на их стабильность после обязательной стерилизации автоклавированием. В данной главе представлены материалы и методы исследования, направленного на научное обоснование выбора оптимальной толщины слоя 3D-печати и оценку влияния автоклавирования на физико-механические и геометрические характеристики навигационных шаблонов из отечественного фотополимерного материала.

Объектом исследования послужил отечественный фотополимер-ный материал Dental Yellow Clear PRO (HARZ Labs, Россия), предназна-ченный для изготовления навигационных хирургических шаблонов методом стереолитографической 3D-печати (Рисунок 1). Химический состав материала включает композицию на основе уретандиметакрилата (UDMA) -- 50–70 %, полиэтиленгликольдимета-крилата (PEGDMA) -- 30–50 %, а также модифицирующие добавки и фотоинициаторную систему. Данный состав обеспечивает формирование плотно сшитой полимерной матрицы с высокими показателями прочности и эластичности. Материал сертифицирован для медицинского применения на территории Российской Федерации (Регистрационное удостоверение № РЗН 2020/12007).



Рисунок 1. Фотополимерный материал Dental Yellow Clear PRO (HARZ Labs, Россия)

Исследование включало три основных этапа, в ходе которых решались задачи по оценке физико-механических характеристик, анализу микроструктуры, а также оценке точности и воспроизводимости навигационных шаблонов.

На первом этапе из фотополимерного материала были изготовлены лабораторные образцы с номинальными размерами (25,0±0,1) × (2,0±0,1) × (2,0±0,1) мм и навигационные шаблоны для дентальной имплантации с различной толщиной слоя 3D-печати (Рисунки 2, 3).

Печать образцов и шаблонов осуществлялась на стереолитографическом 3D-принтере Elegoo Saturn 12K ULTRA (Elegoo, Китай) (Рисунок 4) с использованием двух значений толщины отдельного слоя: 0,1 мм и 0,05 мм.

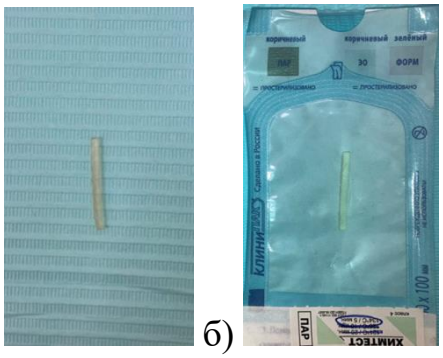


Рисунок 2. Образец из фотополимерного материала:а) неавтоклавированный б) автоклавированный

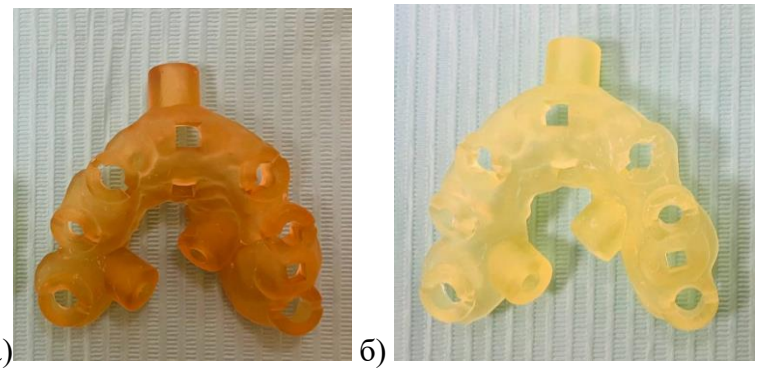


Рисунок 3. Навигационные шаблоны для дентальной имплантации с различной толщиной слоя 3D-печати: а) 0,1 мм б) 0,05 мм



Рисунок 4. Стереолитографический 3D-принтер Elegoo Saturn 12K ULTRA (Elegoo, Китай)

Все образцы после печати подвергались стандартизированной постобработке, включающей промывку в изопропиловом спирте для удаления остатков неполимеризованной смолы, прогрев в сушильном шкафу для снятия внутренних напряжений и финишное световое отверждение в ультрафиолетовой камере (длина волны 405 нм) в течение времени, рекомендованного производителем.

Для оценки влияния стерилизации автоклавированием часть образцов и шаблонов подвергалась паровой стерилизации в автоклаве Vacuklav® 23 B+ (MELAG Medizintechnik, Германия). Стерилизация проводилась в двух режимах: первый режим -- «Мягкая программа» (121°C, 1,1 бар, 15 мин), второй режим -- «Быстрая программа S» (134°C, 2,2 бар, 5 мин). Для проведения испытаний все образцы были распределены по группам в зависимости от толщины слоя печати и режима стерилизации. Таблица 1 демонстрирует распределение образцов для оценки физико-механических характеристик, а Таблица 2 -- для оценки влияния режимов автоклавирования на микроструктуру.

Таблица 1. Распределение образцов по группам в зависимости от толщины слоя 3D-печати и стерилизации автоклавированием (для испытаний на изгиб)

Группа I	**Группа II**	**Группа III**	**Группа IV**
Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**
Неавтоклавированные	**Автоклавированные** (Режим 134°C)	**Неавтоклавированные**	**Автоклавированные** (Режим 134°C)
Толщина слоя 3D-печати – **0,05 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,05 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,1 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,1 мм**

Определение физико-механических характеристик (прочности при изгибе и модуля упругости) проводилось методом статического трехточечного изгиба в соответствии с ГОСТ Р 56924-2016 (Стоматология. Материалы полимерные восстановительные) на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z010 (Zwick, Германия) (Рисунок 5). Расстояние между

опорами составляло 20 мм, скорость перемещения траверсы -- 1,0 мм/мин до разрушения образца.

Таблица 2. Распределение испытуемых образцов в зависимости от толщины слоя 3D-печати и режима стерилизации автоклавированием (для РЭМ-анализа)

Группа I	**Группа II**	**Группа III**
Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**
Неавтоклавированные	**Автоклавированные** (Режим 121°C)	**Автоклавированные** (Режим 134°C)
Толщина слоя 3D-печати – **0,1 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,1 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,1 мм**

Группа IV	**Группа V**	**Группа VI**
Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**	Количество образцов - **10**
Неавтоклавированные	**Автоклавированные** (Режим 121°C)	**Автоклавированные** (Режим 134°C)
Толщина слоя 3D-печати – **0,05 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,05 мм**	Толщина слоя 3D-печати – **0,05 мм**

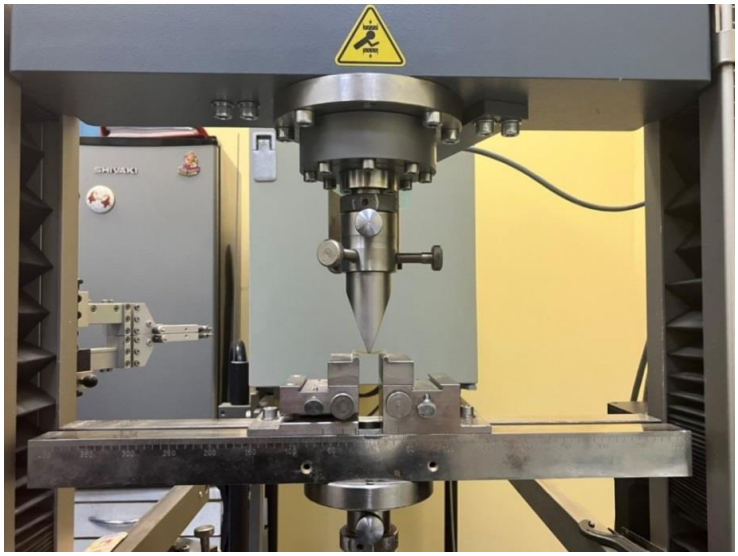


Рисунок 5. Устройство для трехточечного изгиба, установленное в испытательной машине Zwick/Roell Z010

Прочность при изгибе (σ, МПа) вычислялась по формуле: $\sigma_{из} = 3FL / (2bh^2)$, где F -- нагрузка при разрушении образца, Н; L -- расстояние между опорами, мм; b -- ширина образца, мм; h -- высота образца, мм.

Модуль упругости (E, МПа) вычислялся по формуле: $E = (F_1L^3) / (4bh^3d)$, где F_1 -- нагрузка в области упругой деформации, Н; d -- деформация при выбранной нагрузке, мм.

Для выявления зон концентрации напряжений было проведено испытание на изгиб навигационных шаблонов (n=10 в каждой группе) с толщиной слоя 0,05 мм и 0,1 мм.

На втором этапе для оценки влияния режимов автоклавирования на микроструктуру фотополимерного материала проводилось исследование методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Hitachi Regulus8230 (Hitachi High-Tech, Япония). Исследовались образцы из шести групп, указанных в Таблице 2. Съемку изображений проводили в режиме регистрации вторичных электронов (SE) при ускоряющем напряжении 8 кВ. Для предотвращения накопления поверхностного заряда на поверхность образцов напыляли про-

водящий слой сплава золота с палладием (Au/Pd) толщиной 10 нм. Обработку полученных изображений выполняли в программе ImageJ 1.54g.

На третьем этапе проведена оценка точности и воспроизводимости навигационных шаблонов для дентальной имплантации в зависимости от толщины слоя 3D-печати. В основу исследования легли результаты анализа двух серий шаблонов: первую серию (n=10) составили шаблоны, изготовленные с толщиной слоя 0,1 мм, вторую серию (n=10) -- с толщиной слоя 0,05 мм.

Программа измерений включала оценку следующих параметров, важных с клинической точки зрения:

1. Диаметр направляющих отверстий (отверстия «a», «b», «c», «d», «f») с помощью цифрового штангенциркуля.
2. Высота медиальной стенки направляющих отверстий с помощью электронного микрометра.
3. Общеморфометрические показатели шаблона: протяженность дуги (электронный курвиметр), высота шаблона в самой высокой точке (анатомически привязана к уровню бугра первого премоляра), толщина стенки шаблона в области центральных резцов (электронный микрометр).

Для статистической обработки результатов измерений рассчитывались среднее арифметическое значение (M), стандартное отклонение (SD) и 95% доверительный интервал (ДИ). Для проверки статистической гипотезы о наличии значимых различий между группами применялся параметрический t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$. Статистический анализ проведен с использованием специализированного программного обеспечения.

Результаты собственных исследований и их обсуждение

Проведённое комплексное исследование, включавшее оценку физико-механических характеристик, микроструктурный анализ и метрологическую оценку точности, позволило установить четкие закономерности влияния толщины слоя стереолитографической 3D-печати и режимов автоклавирования на свойства навигационных хирургических шаблонов из отечественного фотополимерного материала Dental Yellow Clear PRO.

Результаты испытания на изгиб автоклавированных и неавтоклавированных образцов

Испытания на трехточечный изгиб образцов, изготовленных с толщиной слоя 0,05 мм, показали высокую стабильность физико-механических характеристик. Воздействие автоклавирования (режим 134°C, 2,2 бар, 5 мин) привело к статистически незначимому снижению показателей: прочность при изгибе уменьшилась с 140 ± 11 МПа до 138 ± 7 МПа (на 1,05%), а модуль упругости — с 3242 ± 228 МПа до 3188 ± 161 МПа (на 1,66%) (Таблица 3).

Данные лабораторных испытаний для неавтоклавированных образцов представлены на Рисунке 6, для автоклавированных — на Рисунке 7.

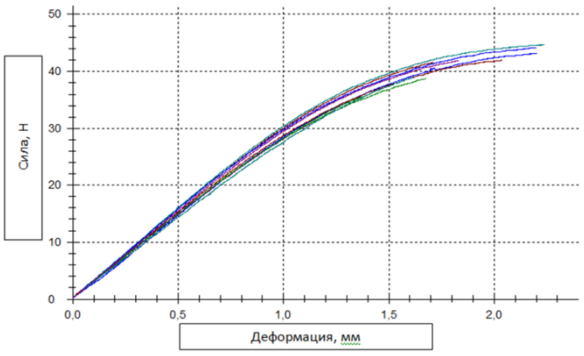


Рисунок 6. График зависимости деформации от приложенного усилия для неавтоклавированных образцов с толщиной слоя 3D-печати 0,05 мм (n=10)

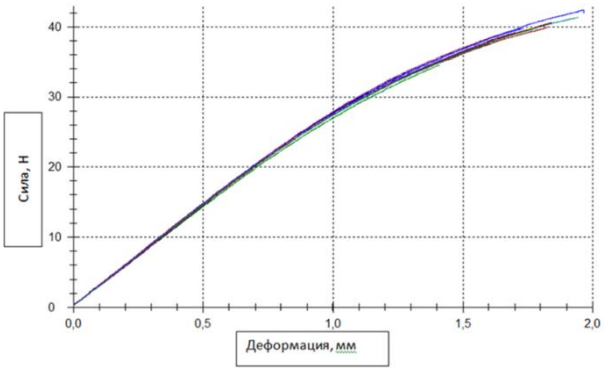


Рисунок 7. График зависимости деформации от приложенного усилия для автоклавированных образцов с толщиной слоя 3D-печати 0,05 мм (n=10)

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на изгиб с толщиной слоя 3D-печати 0,05 мм, M ± m (n=10)

Группа обработки	Прочность при изгибе, МПа (среднее значение)	Модуль упругости при изгибе, МПа (среднее значение)
Неавтоклавированные образцы (n=10)	**140 ± 11**	**3242 ± 228**
Автоклавированные образцы (n=10)	**138 ± 7**	**3188 ± 161**

Аналогичные испытания образцов с толщиной слоя 0,1 мм выявили более выраженное, но некритическое снижение прочностных характеристик после стерилизации: прочность при изгибе снизилась на 15% (с 120 ± 5 МПа до 102 ± 14 МПа), а модуль упругости — на 11,2% (с 2511 ± 199 МПа до 2230 ± 214 МПа) (Таблица 4). Графики зависимости для неавтоклавированных и автоклавированных образцов представлены на Рисунках 8 и 9 соответственно.

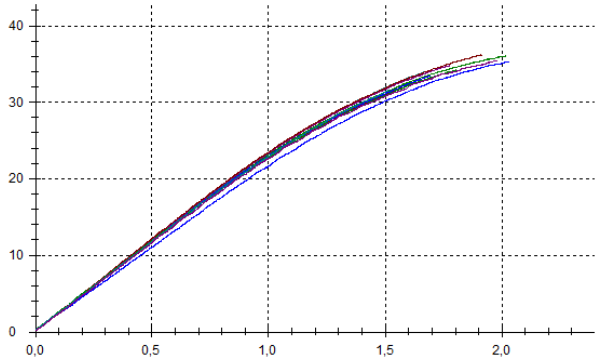


Рисунок 8. График зависимости деформации от приложенного усилия для неавтоклавированных образцов с толщиной слоя 3D-печати 0,1 мм (n=10)

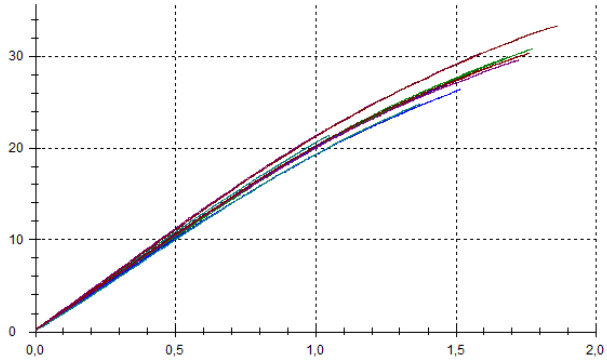


Рисунок 9. График зависимости деформации от приложенного усилия для автоклавированных образцов с толщиной слоя 3D-печати 0,1 мм (n=10)

Таблица 4. Результаты испытаний образцов (n=10) на изгиб, с толщиной слоя 3D-печати 0,1 мм, M ± m

Группа обработки	Прочность при изгибе, МПа (среднее значение)	Модуль упругости при изгибе, МПа (среднее значение)
Неавтоклавированные образцы (n=10)	**120 ± 5**	**2511 ± 199**
Автоклавированные образцы (n=10)	**102 ± 14**	**2230 ± 214**

Сравнительная оценка физико-механических характеристик автоклавированных образцов

Результатом первого этапа явилось выявление статистически значимого влияния толщины слоя печати на физико-механические свойства. Данные лабораторных испытаний для групп сравнения представлены на Рисунках 10 и 11. Сравнительный анализ автоклавированных образцов показал, что увеличение толщины слоя с 0,05 мм до 0,1 мм приводит к достоверному снижению прочности при изгибе на 26% (со 138 ± 7 МПа до 102 ± 14 МПа) и модуля упругости на 30% (с 3188 ± 161 МПа до 2230 ± 214 МПа) (Таблица 5, Рисунок 12 и 13).

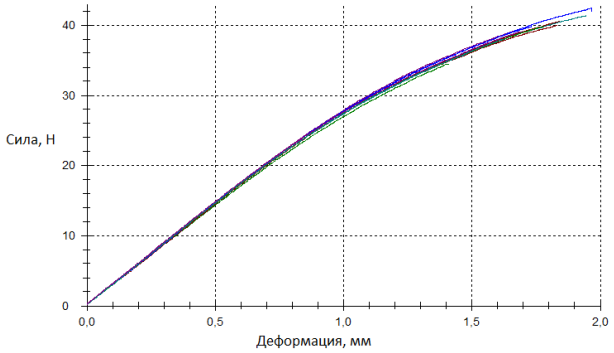


Рисунок 10. График зависимости деформации от приложенного усилия для образцов с толщиной слоя 3D-печати 0,05 мм (n=10), группа №1

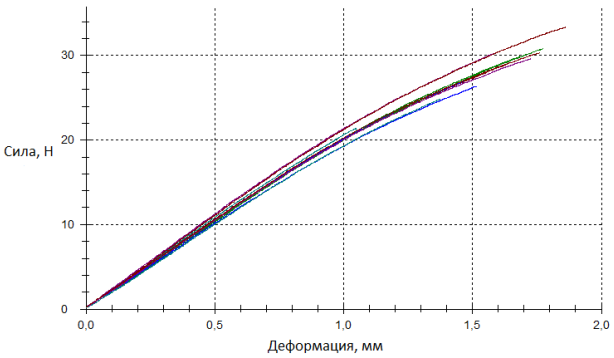


Рисунок 11. График зависимости деформации от приложенного усилия для образцов с толщиной слоя 3D-печати 0,1 мм (n=10), группа №2

Таблица 5. Результаты испытаний образцов (n=10) на изгиб, M ± m

Группа обработки	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, МПа
Группа №1: образцы с толщиной слоя печати 0,05 мм (n=10)	**138 ± 7**	**3188 ± 161**
Группа №2: Образцы с толщиной слоя печати 0,1 мм (n=10)	**102 ± 14**	**2230 ± 214**

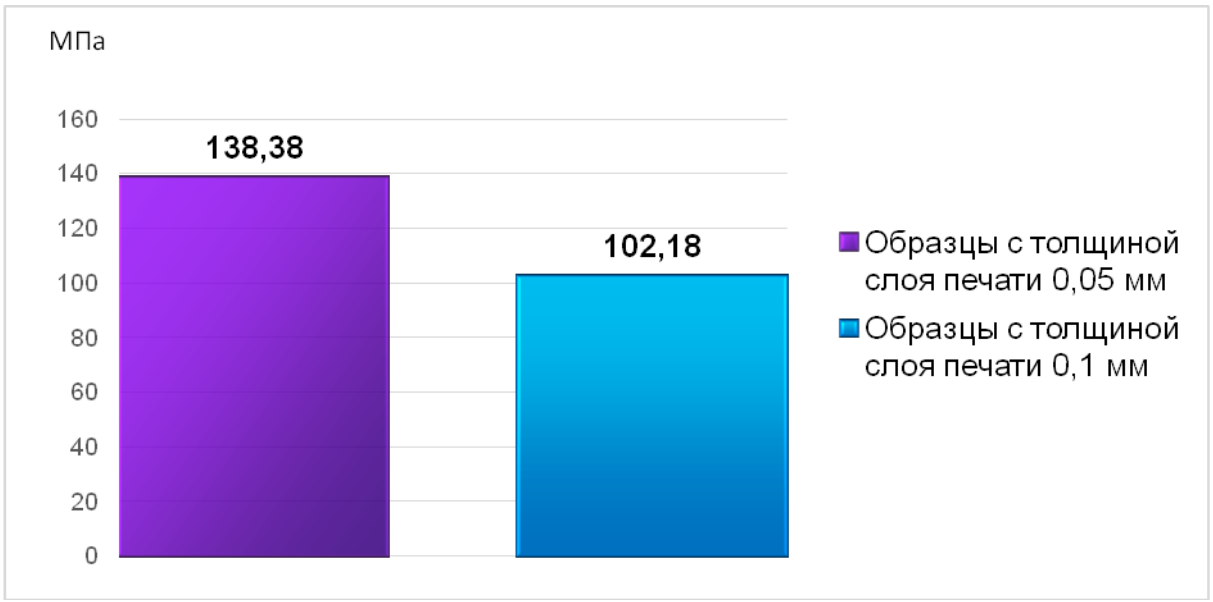


Рисунок 12. Значение прочности образцов при изгибе (МПа)

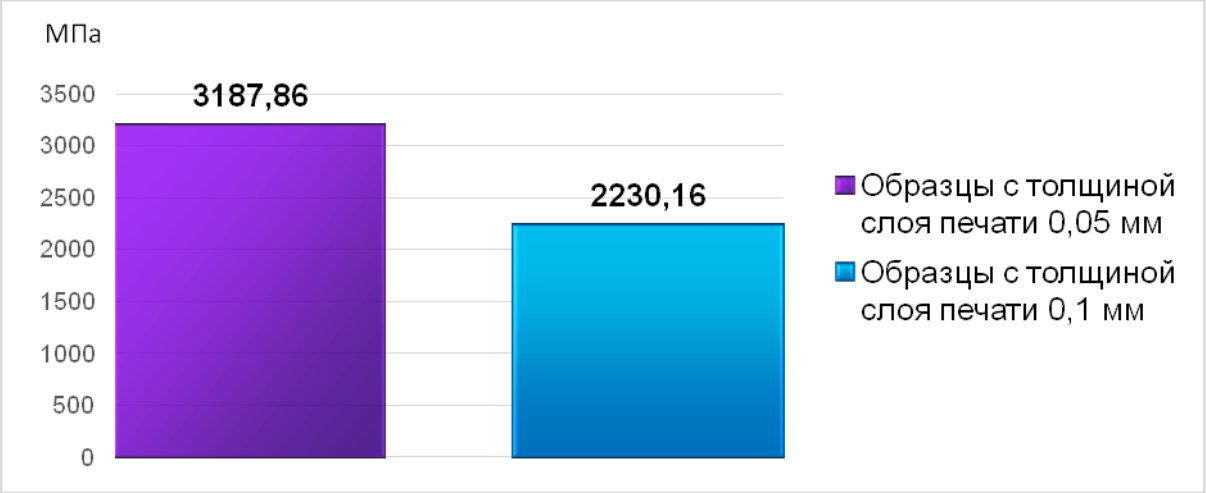


Рисунок 13. Значение модуля упругости образцов при изгибе (МПа)

Полученные данные свидетельствуют о том, что уменьшение толщины слоя обеспечивает более высокую степень конверсии мономера и формирование более плотно сшитой полимерной матрицы, что и обусловливает повышение механической надежности изделий.

Анализ зон концентрации напряжений

Испытание на изгиб навигационных шаблонов выявило, что независимо от толщины слоя печати и значений разрушающей нагрузки, излом образцов происходил в одних и тех же зонах — геометрических концентраторах напряжений. К таким зонам относятся места соединения вертикальной стенки направляющего отверстия с горизонтальным базисом шаблона, узкие перемычки между отверстиями и края шаблона в области дистальных окончаний.

Данный факт свидетельствует о том, что стереолитографическая технология в целом, при корректной калибровке оборудования, обеспечивает достаточную целостность материала, при которой геометрические параметры изделия играют определяющую роль в распределении напряжений. Это позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать зоны потенциального риска еще на этапе компьютерного моделирования (CAD).

Результаты оценки влияния режимов автоклавирования на микроструктуру

Исследование методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) выявило дифференцированное влияние режимов стерилизации на микроструктуру фотополимерного материала (Рисунок 14). Поверхность контрольных образцов (группы I и IV) характеризовалась выраженной слоистой морфологией, типичной для SLA-печати, с четкими межслойными границами.

Образцы, прошедшие стерилизацию в режиме «Мягкая программа» (121°C, 1,1 бар, 15 мин), показали незначительное увеличение шероховатости поверхности и сглаживание границ между слоями, что может быть обусловлено релаксацией внутренних напряжений. При этом признаки деструкции отсутствовали.

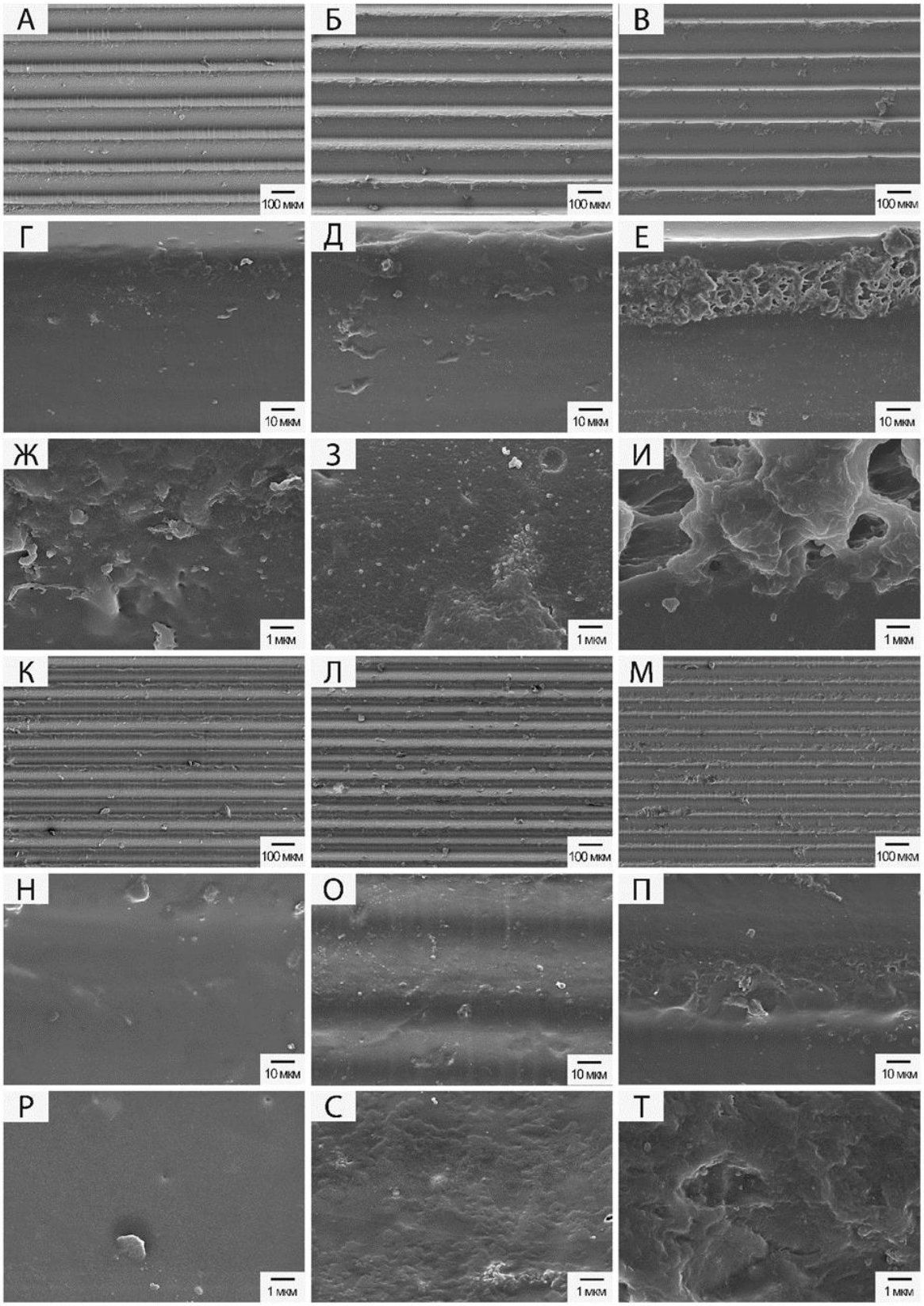


Рисунок 14. Изображения, полученные с помощью растрового электронного микроскопа при различном увеличении для образцов из: группы I «0,1 мм-контроль» (А, Г, Ж); группы II «0,1 мм 121°С» (Б, Д, З); группы III «0,1 мм 134°С» (В, Е, И), группы IV «0,05 мм-контроль» (К, Н, Р); группы V «0,05 мм 121°С» (Л, О, С); группы VI «0,05 мм 134°С» (М, П, Т)

В образцах, стерилизованных в режиме «Быстрая программа S» (134°С, 2,2 бар, 5 мин), зафиксированы более выраженные изменения: снижение четкости межслойных границ, появление локальных участков оплавления и микропор, что указывает на начало процессов

термической деструкции. Важно отметить, что магистральных трещин или межслойного расслоения не обнаружено, что подтверждает сохранение макроскопической целостности материала. Однако микроструктурные изменения после стерилизации при 134°C могут оказывать влияние на долговременную стабильность и точность геометрии изделий.

Результаты оценки точности и воспроизводимости навигационных шаблонов

Метрологический анализ двух серий навигационных шаблонов (n=10 в каждой), изготовленных с толщиной слоя 0,1 мм и 0,05 мм, выявил дифференцированное влияние толщины слоя на точность воспроизведения различных геометрических параметров.

Анализ диаметров направляющих отверстий (Таблицы 6 и 8) показал, что режим печати с толщиной слоя 0,05 мм обеспечивает значительно более высокую стабильность этого критически важного параметра. Ширина доверительных интервалов для всех отверстий в серии 0,05 мм составила всего 0,12–0,14 мм, в то время как в серии 0,1 мм она достигала 0,28 мм для некоторых отверстий. Это свидетельствует о существенном снижении влияния «ступенчатого эффекта» при формировании цилиндрических поверхностей и обеспечивает минимальный и равномерный люфт хирургического инструмента.

Таблица 6. Результаты измерений диаметра направляющих отверстий для серии шаблонов, изготовленных с толщиной слоя 0,1 мм (n=10)

Диаметр направляющего отверстия, мм. Серия 0,1 мм					
Номер шаблона	**a**	**b**	**c**	**d**	**f**
1	5,1	5,2	4,2	4,2	4,1
2	5,1	5,1	4,1	4,0	4,0
3	5,1	5,0	4,1	4,1	4,1
4	5,1	5,0	4,0	4,0	4,0
5	5,0	4,9	3,9	4,1	4,0
6	5,1	5,0	4,0	4,0	4,1
7	5,1	5,1	4,1	4,2	4,0
8	5,1	5,2	4,2	4,0	4,0
9	5,1	4,9	3,9	4,1	4,1
10	5,0	5,0	4,1	4,1	4,0
Среднее арифметическое, мм	5,08	5,04	4,06	4,08	4,04
Стандартное отклонение, мм	0,0447	0,114	0,114	0,0837	0,0548
Доверительный интервал, мм	[5,02; 5,14]	[4,90; 5,18]	[3,92; 4,20]	[3,98; 4,18]	[3,97; 4,11]
Ширина доверительного интервала, мм	0,12	0,28	0,28	0,2	0,14

Таблица 7. Результаты измерений высоты направляющих отверстий для серии шаблонов, изготовленных с толщиной слоя 0,1 мм (n=10)

Диаметр направляющего отверстия, мм. Серия 0,1 мм					
Номер шаблона	**a**	**b**	**c**	**d**	**f**
1	5,1	5,2	4,2	4,2	4,1
2	5,1	5,1	4,1	4,0	4,0
3	5,1	5,0	4,1	4,1	4,1
4	5,1	5,0	4,0	4,0	4,0
5	5,0	4,9	3,9	4,1	4,0
6	5,1	5,0	4,0	4,0	4,1
7	5,1	5,1	4,1	4,2	4,0
8	5,1	5,2	4,2	4,0	4,0
9	5,1	4,9	3,9	4,1	4,1
10	5,0	5,0	4,1	4,1	4,0
Среднее арифметическое, мм	5,08	5,04	4,06	4,08	4,04
Стандартное отклонение, мм	0,0447	0,114	0,114	0,0837	0,0548
Доверительный интервал, мм	[5,02; 5,14]	[4,90; 5,18]	[3,92; 4,20]	[3,98; 4,18]	[3,97; 4,11]
Ширина доверительного интервала, мм	0,12	0,28	0,28	0,2	0,14

Таблица 8. Геометрические параметры для серии шаблонов, изготовленных с толщиной слоя 0,1 мм (n=10)

Номер шаблона (серия 0,1 мм)	Протяженность дуги, мм	Высота шаблона в самой высокой точке, мм	Толщина стенки шаблона в области центральных резцов, мм
1	118	9,3	3,3
2	117	9,3	3,3
3	116	9,4	3,3
4	116	9,4	3,4
5	118	9,2	3,4
6	118	9,3	3,4
7	117	9,4	3,3
8	117	9,4	3,4
9	118	9,3	3,3
10	117	9,2	3,3
Среднее арифметическое, мм	117	9,32	3,34
Стандартное отклонение, мм	1,0	0,084	0,05477
Доверительный интервал, мм	[115,76; 118,24]	[9,22; 9,42]	[3,27; 3,41]
Ширина доверительного интервала, мм	2,48	0,2	0,14

Таблица 9. Результаты измерений диаметра направляющих отверстий для серии шаблонов, изготовленных с толщиной слоя 0,05 мм (n=10)

Диаметр направляющего отверстия, мм. Серия 0,05 мм					
Номер шаблона	**a**	**b**	**c**	**d**	**f**
1	5,0	5,2	4,1	4,0	4,0
2	5,1	5,1	4,0	4,1	4,0
3	5,1	5,1	4,1	4,1	4,1
4	5,1	5,2	4,1	4,1	4,1
5	5,1	5,1	4,1	4,1	4,1
6	5,1	5,1	4,1	4,1	4,0
7	5,1	5,1	4,1	4,1	4,1
8	5,0	5,1	4,0	4,1	4,1
9	5,1	5,1	4,1	4,0	4,0
10	5,1	5,1	4,1	4,1	4,1
Среднее арифметическое, мм	5,08	5,12	4,08	4,08	4,06
Стандартное отклонение, мм	0,0447	0,0447	0,0447	0,0447	0,0548
Доверительный интервал, мм	[5,02; 5,14]	[5,06; 5,18]	[4,02; 4,14]	[4,02; 4,14]	[3,99; 4,13]
Ширина доверительного интервала, мм	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14

Таблица 10. Результаты измерений высоты направляющих отверстий для серии шаблонов, изготовленных с толщиной слоя 0,05 мм (n=10)

Высота направляющего отверстия, мм. Серия 0,05 мм					
Номер шаблона	**a**	**b**	**c**	**d**	**f**
1	5,5	2,2	3,4	4,0	3,5
2	5,4	2,3	3,3	3,9	3,7
3	5,4	2,4	3,4	4,0	3,5
4	5,4	2,4	3,4	4,0	3,7
5	5,4	2,5	3,5	3,9	3,6
6	5,4	2,3	3,4	4,0	3,5
7	5,4	2,3	3,4	4,0	3,7
8	5,5	2,4	3,5	4,1	3,7
9	5,4	2,3	3,4	4,0	3,5
10	5,4	2,3	3,4	4,1	3,6
Среднее арифметическое, мм	5,42	2,34	3,42	4,0	3,6
Стандартное отклонение, мм	0,0447	0,114	0,0837	0,1	0,1
Доверительный интервал, мм	[5,36; 5,48]	[2,25; 2,47]	[3,32; 3,52]	[3,88; 4,12]	[3,48; 3,72]
Ширина доверительного интервала, мм	0,12	0,22	0,2	0,24	0,24

Таблица 11. Геометрические параметры для серии шаблонов, изготовленных с толщиной слоя 0,05 мм (n=10)

Высота направляющего отверстия, мм. Серия 0,05 мм					
Номер шаблона	**a**	**b**	**c**	**d**	**f**
1	5,5	2,2	3,4	4,0	3,5
2	5,4	2,3	3,3	3,9	3,7
3	5,4	2,4	3,4	4,0	3,5
4	5,4	2,4	3,4	4,0	3,7
5	5,4	2,5	3,5	3,9	3,6
6	5,4	2,3	3,4	4,0	3,5
7	5,4	2,3	3,4	4,0	3,7
8	5,5	2,4	3,5	4,1	3,7
9	5,4	2,3	3,4	4,0	3,5
10	5,4	2,3	3,4	4,1	3,6
Среднее арифметическое, мм	5,42	2,34	3,42	4,0	3,6
Стандартное отклонение, мм	0,0447	0,114	0,0837	0,1	0,1
Доверительный интервал, мм	[5,36; 5,48]	[2,25; 2,47]	[3,32; 3,52]	[3,88; 4,12]	[3,48; 3,72]
Ширина доверительного интервала, мм	0,12	0,22	0,2	0,24	0,24

Анализ высоты медиальной стенки отверстий (Таблицы 7 и 10) и общеморфометрических параметров (Таблицы 8 и 11) показал, что обе серии шаблонов демонстрируют высокую и сопоставимую точность воспроизведения этих характеристик. Ширина доверительных интервалов для данных параметров не превышала десятых долей миллиметра, что подтверждает надежность стереолитографической технологии в целом.

Таким образом, по результатам проведённого исследования установлено, что толщина слоя 3D-печати оказывает критическое влияние на физико-механические свойства и прецизионность навигационных шаблонов. Уменьшение толщины слоя с 0,1 мм до 0,05 мм обеспечивает статистически значимое повышение прочности при изгибе на 26% и модуля упругости на 30%, а также максимальную точность воспроизведения диаметров направляющих отверстий (ширина доверительного интервала 0,12–0,14 мм). При этом стандартный цикл автоклавирования (режим 134°C) не оказывает клинически значимого влияния на физи-

ко-механические характеристики материала (снижение прочности не более 1,05%), что подтверждает его пригодность для стерилизации. Режим стерилизации при 121°C является более щадящим для микроструктуры материала. Разработан дифференцированный подход к выбору толщины слоя печати в зависимости от клинической задачи: для сложных случаев, требующих максимальной точности, предпочтителен режим 0,05 мм; для стандартных ситуаций допустимо использование режима 0,1 мм, обеспечивающего клинически приемлемую точность и сокращение времени изготовления.

Выводы

1. Стандартный цикл автоклавирования не оказывает статистически значимого воздействия ($\rho < 0,05$) на физико-механические характеристики образцов из фотополимерного материала при 3D-печати с толщиной слоя 0,05 мм. Снижение показателя прочности при изгибе составляет 1,05 % (снижение с 140 ± 11 МПа до 138 ± 7 МПа), модуля упругости – 1,66 % (снижение с 3242 ± 228 МПа до 3188 ± 161 МПа). Для образцов с толщиной слоя 0,1 мм автоклавирование вызывает снижение механических показателей: прочность при изгибе уменьшается на 15 % (с 120 ± 5 МПа до 102 ± 14 МПа), модуль упругости – на 11,2 % (с 2511 ± 199 МПа до 2230 ± 214 МПа).

2. Увеличение толщины слоя 3D-печати с 0,05 мм до 0,1 мм приводит к статистически значимому ($\rho < 0,05$) ухудшению физико-механических свойств автоклавированных образцов из фотополимерного материала: показатель прочности при изгибе уменьшается на 26 % (со 138±7 МПа до 102±14 МПа), значение модуля упругости при изгибе – на 30 % (с 3188±161 МПа до 2230±214 МПа).

3. Сравнительный анализ двух режимов автоклавирования показал, что оба режима 121°C, 1 бар, 20 мин и 134°C, 2,2 бар, 5 мин по данным растровой электронной микроскопии режим 121°C характеризуется более щадящим влиянием на микроструктуру материала Dental Yellow Clear PRO (отсутствие признаков оплавления и микропор).

4. Толщина слоя 3D-печати оказывает дифференцированное влияние на физико-механические характеристики навигационного шаблона. Печать с толщиной слоя 0,05 мм обеспечивает высокую воспроизводимость диаметров направляющих отверстий (ширина доверительного интервала 0,12–0,14 мм), что является значимым преимуществом для прецизионного позиционирования имплантатов. 3D-печать с толщиной слоя 0,1 мм демонстрирует более вариабельную воспроизводимость диаметров направляющих отверстий (ширина доверительного интервала до 0,28 мм). При этом воспроизводимость таких параметров, как протяженность дуги, высота, толщина стенки в обоих режимах сопоставимо высока (ширина доверительного интервала не превышает 0,2 мм).

5. Дифференцированный подход к выбору толщины слоя зависит от клинической задачи. Режим 0,05 мм является приоритетным в сложных клинических случаях, требующих максимальной точности (эстетически значимые зоны, близость анатомических структур, множественная имплантация), так как обеспечивает наивысшую стабильность направляющих каналов. Режим 0,1 мм может быть рекомендован для стандартных ситуаций (одиночные дефекты в боковых отделах, где приоритетом является оперативность изготовления, а достигаемые прочностные (102 МПа) и точностные показатели остаются в пределах клинической нормы.

Практические рекомендации

1. Для сложных клинических случаев, требующих максимальной точности позиционирования (имплантация в эстетически значимой зоне, при дефиците костной ткани, вблизи нижнечелюстного канала или дна верхнечелюстной пазухи, а также при множественной имплантации и протоколах немедленной нагрузки), рекомендуется использовать толщину слоя 3D-печати 0,05 мм. Данный режим обеспечивает минимальный разброс диаметров направляющих отверстий (ширина доверительного интервала 0,12–0,14 мм) и максимальную прочность при изгибе (138±7 МПа).

2. Для стандартных клинических ситуаций, где приоритетом является оперативность изготовления (одиночные дефекты зубных рядов в боковых отделах, изготовление вспомогательных конструкций, необходимость быстрой замены шаблона), рекомендуется использовать толщину слоя 3D-печати 0,1 мм. Данный режим сокращает время печати в 1,5–2 раза (до 1 часа 20 минут) при сохранении клинически приемлемой прочности (102±14 МПа) и высокой стабильности каркасных параметров шаблона.

3. После завершения 3D-печати необходимо проводить обязательную постобработку: удаление остатков неполимеризованной смолы промывкой в изопропиловом спирте с последующим финишным световым отверждением в УФ-камере (длина волны 405 нм) в течение времени, рекомендованного производителем фотополимера. Следует избегать избыточной механической обработки внутренних поверхностей направляющих отверстий во избежание нарушения их прецизионной геометрии.

4. Для обеспечения стерильности и биобезопасности навигационные шаблоны необходимо подвергать стерилизации в паровом автоклаве. После автоклавирования в режиме 134°C, давление 2,2 бар, время экспозиции 5 минут снижение прочности при изгибе составляет не более 1,05 %, модуля упругости – не более 1,66 %, что не сопровождается деформацией. Однако для стерилизации навигационных шаблонов рекомендуется применять режим 121°C, 1 бар, 15 мин, поскольку он оказывает щадящее влияние на микроструктуру фотопо-

лимерного материала, особенно при необходимости сохранения геометрической точности и долговременной надежности изделий.

5. Перед клиническим использованием необходимо проводить визуальный контроль целостности шаблона после стерилизации и проверку пассивности его посадки на модели челюсти. При наличии микроподвижности или видимых деформаций использовать шаблон не рекомендуется.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Лосев Ф.Ф., Брайловская Т.В., Русанов Ф.С., Поюровская И.Я., Шарганов А.Ф. Сравнительный анализ прочности изготовления хирургических шаблонов из фотополимерного материала Dental Yellow Clear PRO (HARZ Labs). // Стоматология. - 2026. – Т. 105. № 2. – С. 5 8.
2. Лосев Ф.Ф., Брайловская Т.В., Русанов Ф.С., Поюровская И.Я., Шарганов А.Ф. Влияние стерилизации автоклавированием на физико-механические свойства образцов из фотополимерных материалов // Стоматология. – 2026. – Т. 105. №3. – С. 5 9.
3. Лосев Ф.Ф., Брайловская Т.В., Шарганов А.Ф. Оценка точности и воспроизводимости хирургических шаблонов для дентальной имплантации, изготовленных методом стереолитографической 3D-печати. Стоматология для всех - 2026. - № 1 (114). - С. 4-12.
4. Лосев Ф.Ф., Брайловская Т.В., Шарганов А.Ф. Современное состояние вопроса применения хирургических шаблонов для дентальной имплантации при лечении пациентов с отсутствием зубов // Стоматология. — 2025. — Т. 104. — № 6. — С. 60-66.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Абс. – абсолютные значения

AR – дополненная реальность (Augmented Reality)

CAD – компьютерное проектирование (Computer-Aided Design)

CAM – компьютерное производство (Computer-Aided Manufacturing)

DLP – технология цифровой обработки света (Digital Light Processing)

FDM – метод послойного наплавления (Fused Deposition Modeling)

КЛКТ – конусно-лучевая компьютерная томография

MR – смешанная реальность (Mixed Reality)

PLA – полимолочная кислота (полилактид)

PolyJet – струйная 3D-печать фотополимерами

RFA – резонансно-частотный анализ (Resonance Frequency Analysis)

SLA – стереолитография (Stereolithography)

STL – стандартный формат файлов для 3D-печати (Standard Tessellation Language)

UV – ультрафиолетовый (Ultraviolet)

у.е. – условная единица

УФ – ультрафиолетовый

ДИ – доверительный интервал

РЭМ – растровая электронная микроскопия