

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-70-82

УДК 616.31-089

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТРЕХМЕРНО НАПЕЧАТАННЫХ ХИРУРГИЧЕСКИХ ШАБЛОНОВ В СТОМАТОЛОГИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Мамедов С. К.¹, Мураев А. А.¹, Гусейнов Н. А.¹, Эртувханов М. З.², Носков М. Ф.^{3,4}

¹ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

² Центр дентальной травматологии New Iceberg, г. Москва, Россия

³ Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Россия

⁴ Тобольский филиал Тюменского индустриального университета, г. Тобольск, Россия

Аннотация

Современная хирургическая стоматология широко использует трехмерно напечатанные хирургические шаблоны для точного переноса цифрового плана в клинические условия. **Предметом** исследования стало влияние дезинфекции и стерилизации на точность, посадку, механические свойства, состояние поверхности и микробиологическую безопасность таких изделий. **Цель** работы заключалась в систематизированном анализе современных публикаций, посвященных последствиям различных протоколов обработки трехмерно напечатанных стоматологических хирургических шаблонов. Гипотеза исследования состояла в том, что влияние обработки определяется не только способом обеззараживания, но и материалом, технологией печати, режимом последующего отверждения и геометрией конструкции.

Работа выполнена в формате систематизированного литературного обзора. В анализ включали оригинальные экспериментальные исследования, в которых оценивались паровая стерилизация, химическая дезинфекция, низкотемпературные методы обработки и их влияние на функционально значимые характеристики хирургических шаблонов. Синтез данных проводили нарративно, поскольку исследования различались по материалам, технологиям изготовления, протоколам обработки и оцениваемым исходам.

Полученные данные показали, что обработка перед клиническим применением не является нейтральным этапом. Паровая стерилизация при более низкой температуре обычно выглядит более щадящей, чем высокотемпературный режим, однако также может изменить посадку и механические свойства. Химическая дезинфекция чаще сохраняет геометрию, но не может автоматически заменить стерилизацию. Низкотемпературные методы представляют перспективную альтернативу для термочувствительных материалов. Выбор протокола обработки должен основываться на проверенной связке «материал — технология печати — постобработка — режим стерилизации» и подтверждаться контролем точности и безопасности изделия.

Ключевые слова: трехмерно напечатанные хирургические шаблоны, дезинфекция хирургических шаблонов, стерилизация хирургических шаблонов, геометрическая стабильность шаблонов, точность посадки шаблона, систематический обзор

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Сакиг Кямандар оглы МАМЕДОВ ORCID ID 0000-0003-0017-6148

соискатель кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

tamedov_93@mail.ru

Александр Александрович МУРАЕВ ORCID ID 0000-0003-3982-5512

д.м.н., профессор кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

murayev_aa@pfur.ru

Ниджат Айдын Оглы ГУСЕЙНОВ ORCID ID 0000-0001-7160-2023

к.м.н., кафедра челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия nid.gus@mail.ru

Марат Зайнулабидович ЭРТУВХАНОВ ORCID ID 0000-0001-5038-8339

к.м.н., сотрудник Центра дентальной травматологии New Iceberg, г. Москва, Россия

Marat.ertuvkhanov@mail.ru

Михаил Федорович НОСКОВ ORCID ID 0000-0002-4514-7925

д.т.н., профессор, кафедра физики, техники и технологического образования, Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Россия; профессор, кафедра электроэнергетики, Тобольский филиал Тюменского индустриального университета, г. Тобольск, Россия Egg1@rambler.ru

Адрес для переписки: Ниджат Айдын Оглы ГУСЕЙНОВ

141406, Московская область, г. Химки, ул. Пожарского, д. 4

+7 (925) 614-79-46

nid.gus@mail.ru

Образец цитирования:

Мамедов С. К., Мураев А. А., Гусейнов Н. А., Эртувханов М. З., Носков М. Ф.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТРЕХМЕРНО НАПЕЧАТАННЫХ ХИРУРГИЧЕСКИХ ШАБЛОНОВ В СТОМАТОЛОГИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР. Проблемы стоматологии. 2026; 2: 70-82.

© Мамедов С. К. и др., 2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-70-82

Поступила 14.05.2026. Принята к печати 15.06.2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-70-82

**PROCESSING METHODS FOR THREE-Dimensionally PRINTED
SURGICAL GUIDES IN DENTISTRY: A SYSTEMATIZED REVIEW****Mamedov S.K.¹, Muraev A.A.¹, Guseinov N.A.¹, Ertuvhanov M.Z.², Noskov M.F.^{3,4}**¹ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia² New Iceberg Dental Traumatology Center, Moscow, Russia³ Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia⁴ Tobolsk Branch of Tyumen Industrial University, Tobolsk, Russia**Abstract**

Modern surgical dentistry widely uses three-dimensionally printed surgical guides to ensure accurate transfer of a digital plan into clinical practice. The subject of this study was the effect of disinfection and sterilization on the accuracy, fit, mechanical properties, surface condition, and microbiological safety of such devices. The aim of the study was to perform a systematized analysis of current publications devoted to the effects of different processing protocols on three-dimensionally printed dental surgical guides. The study hypothesis was that the effect of processing is determined not only by the method of decontamination, but also by the material, printing technology, post-curing regimen, and geometry of the structure.

The study was conducted as a systematized literature review. The analysis included original experimental studies evaluating steam sterilization, chemical disinfection, low-temperature processing methods, and their effects on functionally significant characteristics of surgical guides. Data synthesis was performed narratively, as the studies differed in materials, manufacturing technologies, processing protocols, and assessed outcomes.

The obtained data showed that processing prior to clinical use has a measurable impact on guide properties. Steam sterilization at a lower temperature generally appears to be more sparing than a high-temperature regimen; however, it may also alter fit and mechanical properties. Chemical disinfection more often preserves geometry but cannot be considered a substitute for sterilization. Low-temperature methods represent a promising alternative for heat-sensitive materials. The choice of a processing protocol should be based on a verified combination of material, printing technology, post-processing, and sterilization regimen, and should be confirmed by control of the guide's accuracy and safety.

Keywords: *three-dimensionally printed surgical guides, disinfection of surgical guides, sterilization of surgical guides, dimensional stability of surgical guides, fit accuracy of surgical guides, systematic review*

The authors declare no conflict of interest

Sakit K. ogly MAMEDOV ORCID ID 0000-0003-0017-6148

degree-seeking applicant at the Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia mamedov_93@mail.ru

Alexander A. MURAEV ORCID ID 0000-0003-3982-5512

PhD, MD, DSc, Professor of the Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
muraev_aa@pfur.ru

Nijat A. ogly GUSEYNOV ORCID ID 0000-0001-7160-2023

PhD, Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry, Federal State Autonomous Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
nid.gus@mail.ru

Marat Z. ERTUVKHANOV ORCID ID 0000-0001-5038-8339

PhD, staff member of the New Iceberg Dental Traumatology Center, Moscow, Russia Marat.ertuvkhanov@mail.ru

Mikhail F. NOSKOV ORCID ID 0000-0002-4514-7925

PhD, DTech, DSc, Professor, Department of Physics, Engineering and Technological Education, Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia; Professor, Department of Electric Power Engineering, Tobolsk Branch of Tyumen Industrial University, Tobolsk, Russia
Eggl@rambler.ru

Correspondence address: Nijat A. ogly GUSEYNOV

4 Pozharskogo Street, Khimki, 141406, Russia

+7 (925) 614-79-46

nid.gus@mail.ru

For citation:

Mamedov S.K., Muraev A.A., Guseinov N.A., Ertuvhanov M.Z., Noskov M.F.

PROCESSING METHODS FOR THREE-Dimensionally PRINTED SURGICAL GUIDES IN DENTISTRY: A SYSTEMATIZED REVIEW. *Actual problems in dentistry*. 2026; 2: 70-82. (In Russ.)

© Mamedov S.K. et al., 2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-70-82

Received 14.05.2026. Accepted 15.06.2026

Введение

Трехмерная печать заняла важное место в современной хирургической стоматологии, прежде всего при изготовлении индивидуальных хирургических шаблонов для дентальной имплантации, установки ортодонтических мини-имплантатов и выполнения других вмешательств, требующих точного переноса цифрового плана в клинические условия [1, 2]. Такие шаблоны обеспечивают направленное позиционирование инструмента или имплантата, поэтому их точность, стабильность посадки и сохранность геометрии имеют прямое значение для безопасности и предсказуемости лечения [3, 4].

Одним из обязательных этапов подготовки хирургического шаблона к применению является его дезинфекция или стерилизация. Однако для трехмерно напечатанных изделий этот этап может быть критическим [5]. Фотополимерные смолы, термопластические материалы и другие полимеры, применяемые для изготовления шаблонов, могут по-разному реагировать на нагревание, давление, химические растворы и низкотемпературные способы обработки [6]. В результате возможны усадка, коробление, изменение посадки, деформация в области направляющей втулки, ухудшение механических свойств и изменение поверхности изделия [7].

Особую проблему представляет отсутствие универсального протокола обработки, одинаково безопасного для всех материалов и технологий печати. Один и тот же режим стерилизации может сохранять точность шаблона, изготовленного из одного материала, и вызывать клинически значимую деформацию другого изделия [8]. Кроме того, большинство имеющихся данных получено в лабораторных условиях, тогда как клиническая проверка влияния обработки на точность установки имплантатов и безопасность вмешательства остается ограниченной [9].

В связи с этим актуальным является систематизированный анализ современных исследований, посвященных влиянию различных методов дезинфекции и стерилизации на трехмерно напечатанные стоматологические хирургические шаблоны. Такой анализ позволяет сопоставить данные о паровой стерилизации, химической дезинфекции и низкотемпературных методах обработки, а также определить факторы, от которых зависит сохранение точности и функциональной пригодности изделия.

Цель исследования — провести систематизированный анализ современных публикаций, посвященных влиянию методов дезинфекции и стерилизации на геометрическую точность, посадку, механические свойства, поверхностные характеристики и микробиологическую безопасность трехмерно напечатанных хирургических шаблонов, применяемых в стоматологии.

Материалы и методы

Работа выполнена в формате систематизированного литературного обзора, посвященного влиянию методов дезинфекции и стерилизации на трехмерно напечатанные хирургические шаблоны, применяемые в стоматологии. Методология отбора и представления данных выполнена в соответствии с рекомендациями PRISMA 2020 [10].

Объектом анализа были оригинальные экспериментальные исследования, в которых изучалось влияние различных протоколов обеззараживания на 3D-печатные стоматологические хирургические шаблоны или стандартизированные образцы, моделирующие их критические зоны. Основное внимание уделяли размерной стабильности, точности посадки, деформации в области направляющей втулки, механическим свойствам, поверхностным изменениям и микробиологической эффективности обработки.

Исследовательский вопрос формулировался следующим образом: как различные методы дезинфекции и стерилизации влияют на геометрическую точность, посадку, механические свойства, структуру поверхности и микробиологическую безопасность 3D-печатных хирургических шаблонов в стоматологии?

Поиск литературы проводили по публикациям, вышедшим с 1 января 2020 года по 01 апреля 2026 года. Временное ограничение было выбрано с учетом быстрого обновления материалов для 3D-печати, технологий аддитивного производства и протоколов обработки медицинских изделий.

Поиск выполняли в электронных базах данных: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Google Scholar, а также, при необходимости, в русскоязычных источниках через eLIBRARY и смежные научные поисковые системы. Дополнительно просматривали списки литературы найденных полнотекстовых статей для выявления релевантных публикаций, не обнаруженных при первичном поиске.

Поисковая стратегия включала комбинации терминов, относящихся к трем основным блокам: 3D-печать, хирургические шаблоны и методы обработки. Булевы операторы AND, OR, усечение слов и кавычки адаптировали под требования каждой базы данных.

В обзор включали исследования, соответствующие следующим критериям:

- Публикация вышла в период с 2020 года по дату последнего поиска включительно;
- Исследование являлось оригинальной экспериментальной работой *in vitro*, лабораторным сравнительным исследованием, пилотным экспериментальным исследованием или клинически ориентированным исследованием с количественной оценкой результатов обработки;
- Объектом исследования были 3D-печатные стоматологические хирургические шаблоны, направляющие для имплантации, шаблоны для ортодонтических мини-имплантатов, шаблоны для эстетического удлинения клинической коронки либо стандартизированные образцы, предназначенные для моделирования критических зон хирургического шаблона;
- В работе оценивался хотя бы один метод дезинфекции или стерилизации: химическая дезинфекция, автоклавирование при 121 °C или 134 °C, низкотемпературная стерилизация, газоплазменная стерилизация, перекись водорода, этиленоксид или другой протокол обработки;
- Исследование содержало количественные или качественные данные о последствиях обработки: раз-

мерные изменения, деформацию, точность посадки, точность в области втулки, механические свойства, микроструктуру поверхности или микробиологическую эффективность;

- Полный текст статьи был доступен для анализа;
- Публикация была представлена на английском или русском языке, содержала достаточные данные для корректного извлечения информации.

Из обзора исключали:

- Обзорные статьи, систематические обзоры, мета-анализы, редакционные статьи, письма в редакцию, тезисы конференций без полнотекстовых данных;
- Исследования, опубликованные до 2020 года;
- Работы, не связанные с 3D-печатными стоматологическими хирургическими шаблонами или их функциональными аналогами;
- Исследования, в которых изучались только точность печати, биосовместимость, цитотоксичность или механические свойства материала без этапа дезинфекции/стерилизации;
- Работы, посвященные традиционно изготовленным шаблонам без применения аддитивных технологий;
- Публикации, в которых отсутствовало описание протокола обработки или исходов после обработки;
- Дублирующие публикации по одной и той же выборке данных; в таких случаях включали наиболее полную версию работы;
- Исследования, в которых объектом были хирургические шаблоны вне стоматологии, если результаты нельзя было перенести на стоматологические направляющие.

Отбор публикаций проводили в несколько этапов. На первом этапе из результатов поиска удаляли дубликаты по названию, DOI, авторам и году публикации. На втором этапе выполняли скрининг названий и аннотаций с исключением нерелевантных публикаций. На третьем

этапе оценивали полнотекстовые статьи на соответствие критериям включения и исключения.

Причины исключения полнотекстовых работ фиксировали отдельно. К основным причинам относили отсутствие 3D-печатного хирургического шаблона как объекта исследования, отсутствие этапа дезинфекции или стерилизации, отсутствие количественных исходов после обработки, публикацию вне заданного временного интервала или невозможность получить полный текст.

Итоговая выборка была внесена в стандартизованную таблицу данных. Изымались следующие данные: общая характеристика исследования, объект исследования, технология изготовления, материал, протокол обработки, группы сравнения, геометрические исходы, направление изменений, механические свойства, поверхностные и структурные изменения

Из-за неоднородности включенных работ количественный метаанализ не проводили. Исследования различались по типу шаблонов, материалам, технологиям печати, режимам постобработки, протоколам дезинфекции/стерилизации, методам измерения и оцениваемым исходам. В приложенном документе эта неоднородность также обозначена как одно из ключевых ограничений доказательной базы.

Синтез данных выполняли нарративно и тематически. Включенные исследования группировали по типу обработки.

Результаты

В количественный анализ было включено 14 публикаций. Блок-схема отбора исследований представлена на рисунке 1. Все включенные исследования имели лабораторный характер: 14 из 14 работ, то есть 100,0 %, были выполнены в формате *in vitro* или экспериментального лабораторного исследования. Клинических исследований с участием пациентов среди включенных публикаций не было. Дизайн и схема исследования были отражены на рисунке 1 и таблице 1.

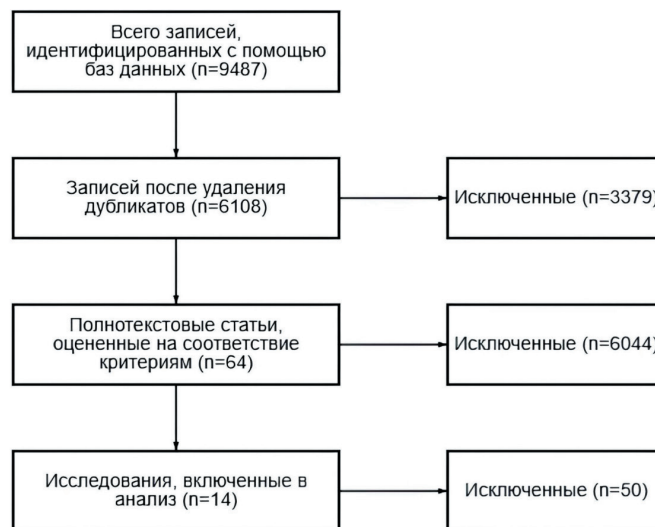


Рис. Блок-схема PRISMA отбора исследований

Fig. PRISMA flow chart for study selection

Таблица 1

Основные данные для включенных исследований
Table 1. Basic data for included studies

Библиография	Общая характеристика исследования	Объект исследования	Технология изготовления	Материал	Протокол обработки	Группы сравнения	Геометрические исходные	Направление изменений	Механические свойства	Поверхностные и структурные изменения
Халил и др. (Khalil R. T. et al.) [11]	Сравнительное лабораторное исследование in vitro	30 хирургических шаблонов для имплантации, разделенных на 60 половинок; для оценки размеров и микробиологии	Стереолитография, Formlabs Form 2; промывка в изопропиловом спирте, сушка, отверждение при 60 °С	Фотополномерная смола Formlabs Form 2; точное торговое название Resin cartridge Form 2	Погружение на 20 мин в кокосовое масло, 2% глицериновый спирт; альдегид или 70% этиловый спирт; оценочные размеры по конусно-лучевой томографии	Кокосовое масло, глицериновый спирт; альдегид и этиловый спирт; соответствующие водные контроли	Кокосовое масло вызывало наименьшие морфологические отклонения; глицериновый спирт и этиловый спирт — более выраженные. Объемные изменения статистически не различались	Все средства вызвали небольшие изменения: минимальные отклонения отмечены после кокосового масла, больше — после глицеринового спирта и этилового спирта	Не изучались	Не изучались
Торек и др. (Török G. et al.) [12]	Пилотное экспериментальное исследование in vitro	Однотипные хирургические направляющие для имплантации с оценкой зон втулки, соединительного участка и перемычки	PolyJet, Objet Eden 350 V; разрешение 16 мкм; постобработка не описана	Objet MED10, Stratasys; биосовместимый материал для хирургических направляющих	Контроль, 4% Gigasetr Instru AF, плазменная стерилизация автоклавом 121 °С и 134 °С, по одному циклу	Контроль, дезинфекция, плазменная стерилизация, автоклав 121 °С и 134 °С	Значимых изменений размеров втулки, перемычки и соединительного участка после дезинфекции, плазменной стерилизации и автоклавирования не выявлено	Устойчивого направления изменений не выявлено; выраженной деформации после обработки не было.	Твердость не менялась после дезинфекции, плазменной стерилизации и автоклавирования. Прочность не менялась разновременно	Микроскопия не выявила трещин, растворения и выраженных структурных повреждений; стойкая структура сохранялась
Поп и др. (Pop S. I. et al.) [13]	Экспериментальное лабораторное исследование	80 шаблонов для ортодонтических мини-имплантатов: 40 SLA и 40 DLP; дополнительно 96 образцов для механических испытаний	SLA и DLP-печать; Form 2 и Asiga Max UV; после печати — промывка в изопропанол, сушка и световое отверждение	Dental SG Resin и DeltaGuide; сравнились две смолы и две технологии печати	Контроль, 4% Gigasetr Instru AF, автоклав 121 °С и 134 °С; оценка механических свойств и разрушения шаблонов	Для SLA и DLP отдельно сравнивали: контроль, дезинфекцию, автоклав 121 °С и 134 °С.	Не изучались	Дезинфекция почти не влияла на свойства; автоклавирование повышало жесткость и хрупкость, особенно при 134 °С	Автоклавирование изменяло механические свойства: у DLP-шаблонов сжимающая нагрузка возрастала, у SLA снижалась; хрупкость увеличивалась, особенно у SLA	Не изучались
Лабакум и др. (Labakoum B. et al.) [14]	Пилотное экспериментальное исследование in vitro	Имплантационные хирургические шаблоны с оценкой зон направляющей втулки; дополнительно образцы для механических испытаний	Жидкокристаллическая печать, Mars 2 Pro; промывка в изопропанол, сушка, доотверждение при 405 нм	SG100 Surgical Guide; фотополимерная смола для жидкокристаллической печати	Контроль, автоклав 121 °С, и 70% изопропиловый спирт	Контроль, автоклав 134 °С и 70% изопропиловый спирт	Изопропиловый спирт обесценил наименее отклонения. Автоклав 121 °С вызывал умеренные изменения, 134 °С — наиболее выраженную деформацию зоны втулки	Термическая обработка вызывала деформацию; тем выше температура, тем сильнее изменения. Спирт давал минимальные отклонения	Автоклавирование меняло механическое поведение: при 121 °С материал становился более хрупким, при 134 °С возрастала жесткость. Изопропиловый спирт значительно не ухудшал свойства	После автоклавирования выявлены выраженные поверхностно-геометрические отклонения; после спиртовой дезинфекции изменения были минимальными.

Библиография	Общая характеристика исследования	Объект исследования	Технология изготовления	Материал	Протокол обработки	Группы сравнения	Геометрические исходные	Направление изменений	Механические свойства	Поверхностные и структурные изменения
Сирбу и др. (Sirbu I. et al.) [15]	Экспериментальное лабораторное исследование	Стандартизированные прямые образцы, имитирующие область втулки хирургического шаблона	SLA/LFS, Form 3B+; стандартная промывка в изопропиловом спирте и доотверждение по протоколу производителя	Surgical Guide Resin V1, Formlabs; смола для имплантационных хирургических шаблонов	Контроль, автоклав 134 °С, 70 % изопропиловый спирт; часть параметров экспозиции не уточнена	CT, AUT121, AUT134 и PRA70; сравнение до и после обработки, а также между группами	Значимые размерные изменения выявлены только после стерилизации при 134 °С; после 121 °С и 70 % изопропилового спирта статистически значимых изменений не было	Автоклавирование при 134 °С вызвало уменьшение размеров; при 121 °С и изопропиловый спирт давали незначительные изменения	Не изучались	Поверхность и внутренняя структура специально не изучались; оценка ограничения линейными размерами
Альшамари и др. (Alshammari S. M. et al.) [16]	Экспериментальное лабораторное исследование	Имплантационный шаблон на основе стандартного стоматологического макета с оценкой внутренней и наружной поверхности	Проектирование в BlueSky Plan, печать на ASIGA Max UV; сравнивали разные способы обработки одного типа шаблона	NextDent SG, Vertex-Dental; фотополимерная смола для хирургических шаблонов	Контроль, 99 % изопропиловый спирт распрыскиванием или ультразвуковым погружением, сухая стерилизация 54 °С, автоклав 121 °С и 134 °С	Шесть способов обработки одного шаблона; измерение исходно, через 3 и 7 дней	Размерная стабильность зависела от срока хранения. Наиболее стабильными были автоклав 121 °С и сухая стерилизация 54 °С и автоклав 134 °С; 99 % спирт давали большие отклонения	Отклонения возрастали к 3-му дню и уменьшались к 7-му. Наиболее стабильными были автоклав 121 °С и сухая стерилизация 54 °С	Не изучались	Форму оценивали по наложению сеток; отдельного микроструктурного или химического анализа не проводили
Мартурелло и др. (Marturello D. M. et al.) [17]	Экспериментальное лабораторное исследование	Стандартизованный макет хирургического шаблона с линейными, круговыми и рельефными элементами	Стереолитография, Form 3B; одинаковая ориентация образцов, промывка в изопропиловом спирте и доотверждение по режиму материала	Пять металлокрилатных смол: Surgical Guide, Biomed Amber, Biomed Clear, Biomed White, Biomed Black.	Сравнивали парную стерилизацию 121 °С, этиленоксид 55 °С и газобраную перекись водорода до 55 °С.	Для каждой смолы сравнивали размеры до и после трех способов стерилизации.	После стерилизации средние изменения размеров всех материалов оставались малыми. Amber и Black были наиболее стабильными; Biomed White — наиболее чувствительной	Изменения были минимальными; паровая стерилизация и перекись водорода были точнее этиленоксида. Amber — наиболее стабильная смола	Не изучались	Поверхность и структура специально не изучались; отмечены различия в четкости элементов и изменение цвета у отдельных смол
Го и др. (Go H.-B. et al.) [18]	Экспериментальное лабораторное исследование	Имплантационные хирургические и стандартные образцы из той же смолы; оценивали форму и прилегание	Цифровая световая проекция, ND 5100; промывка в изопропиловом спирте, удаление опор и световое доотверждение	NextDent SG; ультрафиолетовая отверждаемая акрилатная смола	Контроль, автоклав 121 °С, этиленоксид 55 °С и газобраная перекись водорода	Контроль, автоклав, оксид этилена и газовая плазма перекиси водорода	Все способы стерилизации сохраняли внутреннее прилегание в клинически допустимых пределах. Форма шаблонов, положение отверстий и виртуальная установка имплантата существенно не изменялись	Все методы сохраняли клинически приемлемую точность; автоклавирование давало наименьшее отклонение, газовая плазма — большую вариабельность	Оксид этилена на обесценивал наибольшую прочность при изгибе, автоклавирование — вырывание. После автоклава твердость была максимальной	Поверхность оценивали косвенно по форме, отверстиям и механическим свойствам; выраженных изменений на цветных картах не выявлено

Библиография	Общая характеристика исследования	Объект исследования	Технология изготовления	Материал	Протокол обработки	Группы сравнения	Геометрические исходы	Направление изменений	Механические свойства	Поверхностные и структурные изменения
Язиги и др. (Yazigi S. et al.) [19]	Упрощенная модель с тремя имплантатами ми аналогами и шаблоном с коническими отверстиями	Упрощенная модель с тремя имплантатами ми аналогами и шаблоном с коническими отверстиями	DLP-печать по рекомендациям производителей; контроль: контрольную группу изготовили из соответствующего композита по силиконовой форме	Пять смол для шаблонов: SheraPrint-SG, NexiDent SG, V-Print SG, Opti-print Guide 385, Luxa-Print Ortho; контроль — Luxatemp Fluorescence	Предварительная дезинфекция в Mucalgin, затем автоклав 121 °С; повторные измерения через 48 часов	Пять печатных смол и один контроль; сравнение вертикального зазора и углов стерилизации	После стерилизации вертикальный зазор увеличился, но улучшился при большей нагрузке посадки. Угловые изменения значимыми не были. Лучшие результаты показали V-Print SG, худшие — LuxaPrint Ortho	Основное изменение — увеличение вертикального зазора после стерилизации; при усилении посадки эффект уменьшался	Не изучались	Не изучались
Давид и др. (David S. et al.) [20]	Скелетизированные направляющие для ортодонтических мини-имплантатов на модели верхней челюсти с тремя измерительными метками	Скелетизированные направляющие для ортодонтических мини-имплантатов на модели верхней челюсти с тремя измерительными метками	Пять сочетаний «принтер/смола»: цифровая световая проекция, стерео- и жидкокристаллическая печать; промывка в изопропиловом спирте и до отверждения	Пять сочетаний «принтер/смола»: E-Guide, NexiDent SG, OptiPrint Guide, Dental SG, zSG Ambet	Вакуумное автоклавирование в двух режимах: 121 °С и 134 °С	Пять групп «принтер/смола»; сравнение цифровой модели, шаблона после печати и после стерилизации	Только группа SLA/DSG не показала значимых изменений по всем осям. Остальные сочетания «принтер/смола» изменились хотя бы по одной оси; итоговые отклонения оставались менее 0,5 мм	Чаше отмечались расширение по осям X и Y и усадка по оси Z. Наиболее стабильной была SLA/DSG	Не изучались	Специального анализа поверхности и структуры не проводили; оценка ограничена расстояниями между метками
Гиллиш и др. (Gielisch M. et al.) [21]	Полностью направленные имплантационные шаблоны с оценкой расхождения между планируемым и фактическим положением имплантата	Полностью направленные имплантационные шаблоны с оценкой расхождения между планируемым и фактическим положением имплантата	PLA/PHA печатали методом экструзии расплава, MED610 — методом струйного нанесения материала; после печати удаляли избытки и устанавливали втулки	PLA/PHA как основной материал; MED610 как контроль	Паровая стерилизация 134 °С; стерилизовали половину шаблонов каждой группы	MED610 и PLA/PHA до и после стерилизации.	После стерилизации точность переноса положения имплантата ухудшилась у шаблонов из PLA/PHA, тогда как MED610 сохранил стабильность.	Стерилизация ухудшила точность PLA/PHA-шаблонов, но существенно не повлияла на MED610.	Не изучались напрямую	Отдельный анализ поверхности и структуры не проводили; проводили визуальный осмотр и установку втулок
Рексин и др. (Rexin D. et al.) [22]	Зубо-опорный имплантационный шаблон для одиночного дефекта в области верхней части центрального резца	Зубо-опорный имплантационный шаблон для одиночного дефекта в области верхней части центрального резца	Модели печатали на Photzen Sonic Mini 4K; шаблоны — на SprintRay Pro 95; обработка по инструкции производителя, втулки фиксировали клеем	SprintRay Surgical Guide 3; фотополимерная смола для хирургических шаблонов	Автоклавирование 134 °С по рекомендации производителя смолы	Сравнение установок имплантатов с шаблонами до и после стерилизации	После стерилизации выявлены значимые отклонения положения платформы, верхушки и угла имплантата. Наиболее выраженным было щечно-язычное смещение верхушки; среднее угловое отклонение составило 3,57°	Основное смещение произошло в щечно-язычном направлении, особенно на уровне верхушки имплантата	Не изучались	Прямого анализа поверхности не было; изменения оценивали косвенно по смещению имплантата после стерилизации

Библиография	Общая характеристика исследования	Технология изготовления	Материал	Протокол обработки	Группы сравнения	Геометрические исходные	Направление изменений	Механические свойства	Поверхностные и структурные изменения
Буркхардт и др. (Burkhardt F. et al.) [23]	Шаблоны для статической направленной имплантации на модели нижней челюсти с 17 ориентирами для оценки деформации	Сравнивали CLIP, DLP, SLA и FFF в горизонтальной и вертикальной ориентации; после печати шаблоны сканировали и сопоставляли с цифровой моделью	Keuguide, Luxarprint Ortho, Surgical Guide Formlabs и PETG-нить Clear Base Support Filament	Паровая стерилизация 134 °С; сравнение состояния после печати и после стерилизации	CLIP, DLP, SLA и FFF в горизонтальной и вертикальной ориентации; сравнение до и после стерилизации	После печати все технологии имели высокую точность. После стерилизации FFF-шаблоны выражено деформировались; среди фотополлимерных технологий наиболее стабильной была DLP	После стерилизации возникли коробление и краевые смещения; DLP была наиболее стабильной, FFF — непригодной после автоклава	Не изучались	Цветовые карты показали коробление краевых зон у CLIP и SLA; DLP был стабильнее, FFF имел грубую видимую деформацию
Гонсалес-Барнадас и др. (González-Barnadas A. et al.) [24]	Шаблоны для эстетического удлинения клинической коронки с тремьями внутрирентгеноми для оценки деформации	Пять сочетаний «смола/принтер»: стереолитография, цифровая световая проекция и жидкокристаллическая печать; базовый шаблон толщиной 2 мм с зазором 0,03 мм	Пять смол для шаблонов: Dental SG, Surgical Guide 3, NextDent SG, Keuguide и V Print SG	Автоклавирование 134 °С; сравнение до и после стерилизации с исходным цифровым проектом	Пять групп «смола/принтер»; сравнение цифровой модели, T0 до стерилизации и T1 после стерилизации	После автоклавирования значимые изменения точности появились почти во всех группах, кроме VC. До стерилизации лучшую точность имела FL, после стерилизации — VC; все группы изменялись хотя бы по одной оси	После автоклавирования отклонения обычно возрастали; наиболее стабильной была VC, наиболее неблагоприятные изменения — у SR и KS	Не изучались	Поверхностные изменения оценивали по цветовым картам и внутренней зоне интереса; тонкие участки шаблона были наиболее чувствительными к деформации

Пилотный характер был прямо обозначен в 2 исследованиях из 14, что составило 14,3 %. Остальные 12 работ, или 85,7 %, представляли собой сравнительные или экспериментальные лабораторные исследования.

Экспериментальный материал был неоднородным. В одних исследованиях изучались полноценные хирургические шаблоны или их клинически приближенные модели, в других — стандартизированные макеты, половинки шаблонов. Поэтому прямое суммирование всех объектов как единой выборки является некорректным. По данным таблицы объем экспериментального материала варьировал от 15 образцов в наименьшем исследовании до 176 объектов в наибольшем исследовании.

Наиболее часто объектом изучения были хирургические шаблоны для дентальной имплантации или их лабораторные модели. Они представлены в 9 из 14 исследований, что составило 64,3 % от общего числа включенных публикаций.

Направляющие для установки ортодонтических мини-имплантатов изучались в 2 исследованиях, то есть в 14,3 % публикаций. Шаблоны для эстетического удлинения клинической коронки были представлены в 1 исследовании, что составило 7,1 %.

Еще в 2 исследованиях, или 14,3 %, основным объектом были не полноценные клинические шаблоны, а стандартизированные испытательные образцы или макеты. Дополнительно стандартные образцы для механических испытаний использовались в 3 исследованиях из 14, что составило 21,4 %.

Во включенных публикациях применялись разные технологии трехмерной печати. Наиболее часто использовалась стереолитография или ее варианты — в 7 из 14 исследований, что составило 50,0 %. Цифровая световая проекция применялась в 7 исследованиях, то есть в 50 %.

Жидкокристаллическая фотополимеризация или печать с использованием жидкокристаллического экрана встречалась в 3 исследованиях, что составило 21,4 %. Струйное нанесение материала, включая технологию PolyJet, было представлено в 2 исследованиях, или 14,3 %. Экструзия расплава также применялась в 2 исследованиях, что составило 14,3 %. Технология SLIP встречалась в 1 исследовании, то есть в 7,1 %.

В 5 исследованиях из 14, или 35,7 %, напрямую сравнивались разные технологии печати. В остальных 9 исследованиях, что составило 64,3 %, применялась одна основная технология изготовления.

По характеру изучаемых материалов включенные исследования распределились поровну. В 7 работах из 14, то есть в 50,0 %, изучался один основной материал. В других 7 исследованиях, также 50,0 %, сравнивались несколько материалов, смол или сочетаний «материал — принтер».

Наиболее часто во включенных исследованиях изучалась паровая стерилизация. Она была представлена в 13 из 14 публикаций, что составило 92,9 %. Только одно исследование не включало паровую стерилизацию и было сосредоточено на химической обработке.

Режим паровой стерилизации при 121 °C оценивался в 9 исследованиях из 14, то есть в 64,3 %. Режим 134 °C

изучался несколько чаще — в 10 исследованиях, что составило 71,4 %.

Химическая дезинфекция была представлена в 6 исследованиях из 14, или 42,9 %. В эту группу входили протоколы с применением этилового спирта, изопропилового спирта, глутарового альдегида, Gigasept Instru AF и экспериментальных средств.

Низкотемпературные способы стерилизации были изучены в 4 исследованиях, что составило 28,6 %. К ним относились газоплазменная стерилизация, обработка перекисью водорода, стерилизация оксидом этилена и сухая низкотемпературная обработка. Оксид этилена использовался в 2 исследованиях, то есть в 14,3 %. Газовая плазма или перекись водорода применялись в 3 исследованиях, что составило 21,4 %. Сухая низкотемпературная стерилизация при 54 °C была представлена в 1 исследовании, или 7,1 %.

Обсуждение

Включенные исследования формируют преимущественно лабораторную доказательную базу, посвященную влиянию дезинфекции и стерилизации на трехмерно напечатанные хирургические шаблоны, направляющие для ортодонтических мини-имплантатов и шаблоны для эстетического удлинения клинической коронки. Совокупность данных показывает, что обработка перед клиническим применением не является нейтральным этапом: даже без видимой деформации она может изменять посадку шаблона, точность в области направляющей втулки, вертикальный зазор, краевые участки, а также твердость, жесткость, прочность и хрупкость материала [12–16, 18].

Основной общий вывод состоит в том, что результат обработки зависит не только от самого метода обеззараживания, но и от материала, технологии печати, режима последующего отверждения, геометрии изделия, толщины конструкции, зоны измерения и параметров цикла [14, 16, 20, 21, 23, 24]. Поэтому один и тот же режим нельзя автоматически переносить на другие материалы, принтеры или типы шаблонов. В одних исследованиях паровая стерилизация при 121 °C или низкотемпературные методы сохраняли размерную стабильность [12, 16–18], тогда как в других автоклавирующее сопровождалось изменением геометрии, механических свойств или точности переноса положения имплантата [14, 15, 20–24].

Химическая дезинфекция в целом чаще выглядела более щадящей для формы и свойств материала, чем высокотемпературное автоклавирующее, особенно при 134 °C [12–15]. Однако ее нельзя рассматривать как полноценную замену стерилизации хирургического изделия. Микробиологическая эффективность прямо оценивалась только в одной работе [11], тогда как большинство исследований изучало преимущественно последствия обработки для геометрии, посадки, поверхности или механических свойств.

Паровая стерилизация при 121 °C в ряде работ имела более благоприятный профиль по сравнению с 134 °C [12, 15, 16, 18, 19], но также не была универсально без-

опасной: отдельные исследования фиксировали изменения прилегания, размеров или механических характеристик [14, 18–20]. Режим 134 °С чаще ассоциировался с усадкой, короблением, снижением точности и изменением свойств материала, особенно у термочувствительных смол и отдельных технологий печати [14, 15, 20–24]. Низкотемпературные методы, включая перекись водорода, газоплазменную стерилизацию и этиленоксид, могут быть более щадящей альтернативой, но их эффект также зависит от конкретного материала и конструкции [12, 17, 18].

Обсуждение. Химическая дезинфекция

Химическая дезинфекция во включенных исследованиях рассматривалась как менее термически агрессивный способ обработки трехмерно напечатанных шаблонов. В эту группу вошли протоколы с применением 70 % этилового спирта, 70 % и 99 % изопропилового спирта, 2 % глутарового альдегида, 4 % Gigasept Instru AF, а также экспериментального средства — кокосового масла первого отжима [11–16]. В отличие от автоклавирования, эти методы не сопровождалась воздействием высокой температуры и давления, поэтому потенциально могли меньше влиять на форму и посадку изделий.

В большинстве работ химическая дезинфекция действительно выглядела более щадящей для геометрии и свойств материала. В исследовании Терек и др. обработка 4 % Gigasept Instru AF не приводила к значимым размерным изменениям шаблонов [12]. В работе Поп и др. дезинфекция тем же раствором практически не изменяла механическое поведение образцов, тогда как автоклавирование влияло на жесткость, хрупкость и характер разрушения [13]. Лабакум и др. показали, что 70 % изопропиловый спирт вызывал меньшие отклонения критической зоны направляющей втулки, чем автоклавирование при 121 °С и особенно при 134 °С [14]. Сходно, в исследовании Сирбу и др. после обработки 70 % изопропиловым спиртом отмечалась лишь тенденция к уменьшению размеров без статистической значимости, тогда как режим 134 °С приводил к значимому уменьшению размеров [15].

Однако эти данные не позволяют считать химическую дезинфекцию универсально безопасной для всех шаблонов. В работе Альшаммари и др. методы с 99 % изопропиловым спиртом, включая распыление и погружение с ультразвуком, сопровождалась более выраженными размерными изменениями, чем автоклавирование при 121 °С и сухая низкотемпературная стерилизация при 54 °С [16]. Это показывает, что итоговый эффект зависит не только от факта химической обработки, но и от концентрации вещества, способа нанесения, времени экспозиции, материала и срока наблюдения после обработки.

Отдельное значение имеет исследование Халил и др., поскольку оно включало не только геометрическую, но и микробиологическую оценку. Все три изученных средства — кокосовое масло первого отжима, 2 % глутаровый альдегид и 70 % этиловый спирт — обеспечили

полное подавление бактериального роста в условиях эксперимента [11]. При этом кокосовое масло вызывало наименьшие морфологические отклонения, однако его следует рассматривать как экспериментальный вариант, а не как клинически стандартизированный протокол обработки хирургических шаблонов.

Главное ограничение этой группы исследований состоит в том, что большинство работ оценивало не микробиологическую безопасность, а сохранность геометрии, посадки или механических свойств. Поэтому химическая дезинфекция может рассматриваться как геометрически более щадящий подход, особенно по сравнению с высокотемпературным автоклавированием, но она не является прямым эквивалентом стерилизации хирургического изделия. Для клинического применения важен не только вопрос «деформируется ли шаблон после обработки», но и вопрос «обеспечивает ли выбранный протокол необходимый уровень микробной безопасности».

Обсуждение. Низкотемпературная стерилизация: перспективный вариант для термочувствительных материалов

Низкотемпературная стерилизация рассматривается во включенных исследованиях как потенциально более щадящая альтернатива автоклавированию, особенно для термочувствительных фотополимерных материалов. К этой группе относятся обработка перекисью водорода, газоплазменная стерилизация, стерилизация оксидом этилена и сухая низкотемпературная обработка [12, 16–18]. Их общее преимущество заключается в меньшей тепловой нагрузке по сравнению с паровой стерилизацией при 121 °С и особенно при 134 °С.

В работе Терек и др. газоплазменная стерилизация перекисью водорода не приводила к значимым размерным изменениям шаблонов, что позволяет рассматривать данный метод как геометрически щадящий вариант обработки [12]. В исследовании Мартурелло и др. низкотемпературные методы также оценивались как альтернатива автоклавированию, однако результат зависел от конкретной смолы: одни материалы сохраняли стабильность, тогда как другие демонстрировали изменения после обработки [17]. Это подчеркивает, что низкотемпературный режим сам по себе не гарантирует полной безопасности для всех изделий.

Сходные данные представлены в работе Го и др., где автоклавирование, стерилизация оксидом этилена и газоплазменная стерилизация сохраняли размерную точность, но по-разному влияли на прочность, твердость и прозрачность материала [18]. В исследовании Альшаммари и др. сухая низкотемпературная стерилизация при 54 °С показала благоприятный профиль размерной стабильности по сравнению с отдельными вариантами химической обработки [16].

Обсуждение. Паровая стерилизация: 121 °С, 134 °С

Паровая стерилизация была наиболее часто изучаемым способом обработки трехмерно напечатанных хирургических шаблонов. В совокупности данные показывают, что режим 121 °С обычно выглядит более

падающим, чем 134 °С, однако не является полностью нейтральным. В ряде работ обработка при 121 °С не приводила к выраженной потере размерной стабильности или сохраняла клинически приемлемую точность шаблонов [12, 16–18]. Так, в исследовании Терек и др. автоклавирование при 121 °С не сопровождалось значимыми размерными изменениями [12], а в работе Го и др. после такого режима сохранялась точность внутреннего прилегания и виртуального положения имплантата [18].

В то же время отдельные исследования показывают, что даже 121 °С может изменять функциональные свойства изделия. В работе Язиги и др. после паровой стерилизации при 121 °С увеличивался вертикальный зазор между шаблоном и моделью, хотя угловая точность существенно не нарушалась [19]. Лабакум и др. также показали, что автоклавирование при 121 °С вызывало большие отклонения в зоне направляющей втулки, чем химическая дезинфекция 70 % изопропиловым спиртом [14]. В исследовании Го и др. геометрия сохранялась, но прочность при изгибе после автоклавирования была ниже, чем в контрольной группе и после стерилизации оксидом этилена [18]. Следовательно, сохранение формы после 121 °С не всегда означает сохранение всех механических характеристик.

Режим 134 °С в большинстве работ следует рассматривать как более рискованный. Он чаще ассоциировался с усадкой, короблением, изменением точности посадки, отклонениями в зоне втулки и изменением механического поведения материала [14, 15, 20–24]. В исследовании Сирбу и др. именно автоклавирование при 134 °С приводило к значимому уменьшению размеров шаблонов, тогда как 70 % изопропиловый спирт и режим 121 °С не вызывали статистически значимых изменений [15]. Лабакум и др. также показали, что 134 °С сопровождался наиболее выраженной деформацией в критической зоне направляющей втулки [14].

Особенно важно, что при 134 °С изменения могут затрагивать не только сам шаблон, но и итоговую точность хирургической навигации. В работе Гилиш и др. после стерилизации при 134 °С ухудшалась точность шаблонов из PLA/PHA, тогда как MED610 был устойчивее [21]. Рексин и др. показали статистически значимые отклонения положения имплантата после автоклавирования, наиболее выраженные на уровне верхушки [22]. Буркхардт и др. выявили грубое коробление FFF-шаблонов из PETG после 134 °С, тогда как DLP-шаблоны сохраняли лучшую стабильность [23]. В исследовании Гонсалес-Барнадас и др. большинство сочетаний «смола — принтер» после 134 °С демонстрировали значимые размерные изменения, что особенно важно для тонких шаблонов эстетического удлинения коронки [24].

В целом паровая стерилизация не может рассматриваться как универсально безопасный метод обработки трехмерно напечатанных хирургических шаблонов. Режим 121 °С выглядит более предпочтительным, но требует контроля посадки, зоны втулки и механических свойств. Режим 134 °С следует применять с особой осто-

рожностью, поскольку он чаще приводит к деформации, изменению свойств материала и потенциальному снижению точности хирургического переноса.

Обсуждение. Материал, технология печати и геометрия как главные модификаторы результата

Различия между исследованиями показывают, что эффект дезинфекции или стерилизации нельзя объяснить только выбранным режимом обработки. Существенное значение имеют материал, технология печати и геометрия изделия. Один и тот же температурный или химический протокол может быть приемлемым для одной смолы, но сопровождаться деформацией, изменением механических свойств или снижением точности при использовании другого материала [13, 17, 20–24].

Материал является одним из ключевых факторов. В исследовании Мартурелло и др. разные биосовместимые смолы, напечатанные на одном принтере, неодинаково реагировали на стерилизацию: часть материалов сохраняла стабильность, тогда как другие демонстрировали более выраженные изменения [17]. Аналогично, Гилиш и др. показали, что после паровой стерилизации точность шаблонов из PLA/PHA ухудшалась, тогда как MED610 оставался более стабильным [21]. Это подтверждает, что выводы по одному материалу нельзя автоматически переносить на другие смолы или термопластические полимеры.

Технология печати также существенно влияет на результат. В работе Поп и др. автоклавирование по-разному меняло механическое поведение шаблонов, изготовленных методами стереолитографии и цифровой световой проекции [13]. Давид и др. показали, что разные сочетания «принтер — смола» давали неодинаковые изменения после печати и автоклавирования, причем единственной стабильной по всем осям была группа SLA/DSG [20]. Буркхардт и др. установили, что после стерилизации при 134 °С шаблоны, изготовленные методом экструзии расплава из PETG, грубо коробились, тогда как фотополимерные технологии, особенно цифровая световая проекция, сохраняли лучшую стабильность [23].

Геометрия шаблона определяет, насколько небольшие изменения становятся клинически значимыми. Наиболее уязвимыми зонами являются область направляющей втулки, краевые участки, тонкие участки шаблона и элементы, отвечающие за точную посадку на зубы или слизистую [14, 15, 19, 23, 24]. Например, увеличение вертикального зазора после стерилизации может частично компенсироваться усилием посадки, но это не отменяет риска неполного прилегания в клинических условиях [19]. Для тонких шаблонов эстетического удлинения клинической коронки даже малые смещения по вертикальной оси могут иметь значение для положения линий гингивэктомии и остеотомии [24].

Следовательно, при оценке протоколов обработки необходимо анализировать не изолированный метод стерилизации, а всю технологическую цепочку: материал, принтер, режим последующего отверждения, конструкцию шаблона и критические зоны измерения.

Именно эти факторы объясняют, почему в одних исследованиях обработка сохраняла точность, а в других приводила к деформации или изменению функциональных свойств изделия.

Обсуждение. Разрыв между геометрической стабильностью и микробиологической безопасностью

В большинстве включенных исследований основной акцент был сделан на сохранении формы, посадки и механических свойств трехмерно напечатанных шаблонов после обработки. Однако такие данные не позволяют напрямую судить о микробиологической безопасности изделия. Сохранение геометрии после дезинфекции или стерилизации означает лишь отсутствие выраженной деформации, но не доказывает полного устранения микроорганизмов.

Микробиологическая эффективность прямо оценивалась только в исследовании Халил и др., где сравнивались кокосовое масло первого отжима, 2 % глутаровый альдегид и 70 % этиловый спирт [11]. В остальных работах выводы о пригодности обработки в основном строились на размерной стабильности, точности посадки, изменении поверхности или механических свойствах.

Поэтому между двумя задачами существует методический разрыв: один протокол может быть геометрически щадящим, но недостаточно обоснованным с точки зрения стерильности; другой может обеспечивать более высокий уровень обеззараживания, но ухудшать точность шаблона. Для клинического применения необходимо оценивать оба компонента одновременно: микробиологическую безопасность и сохранение функциональной точности изделия.

Обсуждение. Клинические последствия для выбора протокола обработки

С клинической позиции выбор протокола обработки должен основываться не на универсальной схеме, а на проверенной связке «материал — технология печати — постобработка — режим обеззараживания» [14, 17, 20–24]. Один и тот же режим может сохранять точность одного шаблона и вызывать деформацию другого, особенно при различиях в смоле, толщине конструкции и способе печати.

Наиболее осторожной тактикой является использование режима, подтвержденного производителем материала и дополнительно проверенного в условиях конкретной лаборатории. Паровая стерилизация при 121 °C в целом выглядит более предпочтительной, чем 134 °C, но также требует контроля посадки и критических зон шаблона [12, 14–16, 18–20]. Режим 134 °C следует применять особенно осторожно, поскольку он чаще связан с усадкой, короблением и изменением точности [14, 15, 21–24].

Химическая дезинфекция может быть геометрически щадящей, но не должна рассматриваться как полноценная замена стерилизации хирургического изделия без микробиологического и нормативного обоснования [11–16]. Низкотемпературные методы стерилизации являются перспективной альтернативой для термочув-

ствительных материалов, однако их также необходимо проверять по геометрическим и механическим исходам [12, 17, 18].

Обсуждение. Ограничения доказательной базы и перспективы дальнейших исследований

Доказательная база по обработке трехмерно напечатанных хирургических шаблонов остается неоднородной и преимущественно лабораторной. Большинство работ оценивало отдельные физико-механические или геометрические параметры после дезинфекции и стерилизации, но редко воспроизводило полный клинический путь изделия: печать, последующее отверждение, обработку, посадку в полости рта и итоговую точность хирургического переноса.

К основным ограничениям относятся:

- Преобладание лабораторных исследований без клинической проверки результата;
- Различия в материалах, принтерах, режимах последующего отверждения и конструкции шаблонов;
- Неодинаковые методы измерения: в одних работах оценивали размеры, в других — посадку, механические свойства или точность установки имплантата;
- Ограниченное число исследований с оценкой реальной хирургической точности;
- Недостаточная микробиологическая проверка: прямое изучение подавления микроорганизмов представлено фактически только в одной работе;
- Редкая оценка повторных циклов обработки и отсроченных изменений материала после стерилизации;
- Отсутствие единого клинически значимого порога деформации, после которого шаблон следует считать непригодным.

Дальнейшие исследования должны быть направлены не только на сравнение отдельных режимов обработки, но и на проверку всей технологической цепочки. Наиболее значимыми направлениями являются:

- Прямое сравнение 121 °C, 134 °C, низкотемпературной стерилизации и химической дезинфекции на одинаковых шаблонах;
- Отдельная оценка области направляющей втулки, краевых участков и зон опоры;
- Одновременное изучение геометрии, механических свойств и микробиологической безопасности;
- Проверка разных материалов и технологий печати в стандартизированных условиях;
- Анализ нескольких циклов обработки, а не только однократной стерилизации;
- Проведение клинических исследований с оценкой точности установки имплантатов после обработки шаблона.

Заключение

Проведенный обзор показал, что дезинфекция и стерилизация трехмерно напечатанных хирургических шаблонов в стоматологии не являются нейтральными этапами подготовки изделия к применению. В анализ было включено 14 публикаций, и все они имели лабораторный характер, что ограничивает прямой перенос результатов в клиническую практику.

Влияние обработки зависит не только от метода обеззараживания, но и от материала, технологии печати, режима последующего отверждения, толщины и формы шаблона, а также от зоны измерения. Поэтому один и тот же режим может сохранять точность одного изделия и вызывать деформацию другого.

Паровая стерилизация при 121 °С в целом выглядит более щадящей, чем режим 134 °С, однако также не является универсально безопасной. Она может изменять посадку, вертикальный зазор, механические свойства и точность в области направляющей втулки. Режим 134 °С следует рассматривать как более рискованный, поскольку он чаще связан с усадкой, короблением и снижением точности хирургического переноса.

Химическая дезинфекция обычно меньше влияет на форму и свойства материала, но не может автоматиче-

ски заменять стерилизацию хирургического изделия, поскольку микробиологическая эффективность изучалась недостаточно. Низкотемпературные методы стерилизации, включая перекись водорода, газоплазменную стерилизацию и оксид этилена, являются перспективной альтернативой для термочувствительных материалов, но требуют отдельной проверки для каждой технологической цепочки.

Выбор протокола обработки должен основываться на подтвержденной связке «материал — технология печати — постобработка — режим стерилизации». Дальнейшие исследования должны одновременно оценивать геометрическую стабильность, механические свойства и микробиологическую безопасность шаблонов, а также включать клиническую проверку точности установки имплантатов после обработки.

Литература/References

1. Khorsandi D., Fahimipour A., Abasian P., Saber S. S., Seyedi M., Ghanavati S. et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta biomaterialia*. 2021;122:26–49. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.12.044>
2. Mihit Mihit F. Z., Zubizarreta-Macho Á., Montiel-Company J. M., Albaladejo Martínez A. Systematic review and network meta-analysis of the accuracy of the orthodontic mini-implants placed in the inter-radicular space by image-guided-based techniques. *BMC Oral Health*. 2023;23(1):383. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03079-8>
3. Shi Y., Wang J., Ma C., Shen J., Dong X., Lin D. A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. *International journal of implant dentistry*. 2023;9(1):38. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00507-w>
4. Tahmaseb A., Wu V., Wismeijer D., Coucke W., Evans C. The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clinical oral implants research*. 2018;29 (Suppl 16):416–435. <https://doi.org/10.1111/clr.13346>
5. Valls-Esteva A., Lustig-Gainza P., Adell-Gomez N., Tejo-Otero A., Engli-Rueda M., Julian-Alvarez E. et al. A state-of-the-art guide about the effects of sterilization processes on 3D-printed materials for surgical planning and medical applications: A comparative study. *International journal of bioprinting*. 2023;9(5):756. <https://doi.org/10.18063/ijb.756>
6. Cai H., Xu X., Lu X., Zhao M., Jia Q., Jiang H. B. et al. Dental Materials Applied to 3D and 4D Printing Technologies: A Review. *Polymers (Basel)*. 2023;15(10):2405. <https://doi.org/10.3390/polym15102405>
7. Sharma N., Cao S., Msallem B., Kunz C., Brantner P., Honigmann P. et al. Effects of Steam Sterilization on 3D Printed Biocompatible Resin Materials for Surgical Guides—An Accuracy Assessment Study. *Journal of clinical medicine*. 2020;9(5):1506. <https://doi.org/10.3390/jcm9051506>
8. Marei H. F., Alshahaia A., Alarififi S., Almasoud N., Abdelhady A. Effect of Steam Heat Sterilization on the Accuracy of 3D Printed Surgical Guides. *Implant Dentistry*. 2019;28(4):372–377. <https://doi.org/10.1097/ID.0000000000000908>
9. Putra R. H., Yoda N., Astuti E. R., Sasaki K. The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Prosthodontic Research*. 2022;66(1):29–39. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_20_00184
10. Page M. J., McKenzie J. E., Bossuyt P. M., Boutron I., Hoffmann T. C., Mulrow C. D. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372: n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
11. Khalil R. T., Alshimy A., Elsherbini E., Abd-Ellah M. E. The microbiological effect of virgin coconut oil on the morphological and volumetric dimensional changes of 3D printed surgical guides (in vitro study). *BMC Oral Health*. 2022;22(1):636. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02671-8>
12. Török G., Gombocz P., Bognár E., Nagy P., Dinya E., Kispélyi B. et al. Effects of disinfection and sterilization on the dimensional changes and mechanical properties of 3D printed surgical guides for implant therapy — pilot study. *BMC Oral Health*. 2020;20(1):19. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-1005-0>
13. Pop S. I., Dudescu M., Mihali S. G., Păcurar M., Bratu D. C. Effects of Disinfection and Steam Sterilization on the Mechanical Properties of 3D SLA- and DLP-Printed Surgical Guides for Orthodontic Implant Placement. *Polymers (Basel)*. 2022;14(10):2107. <https://doi.org/10.3390/polym14102107>
14. Labakoum B., Farhan A., Taleb L. B., Mouhsen A., Lyazidi A. Effects of autoclaving and disinfection on 3D surgical guides using LCD technology for dental implant. *3D printing in medicine*. 2024;10(1):14. <https://doi.org/10.1186/s41205-024-00214-1>
15. Sirbu I., Custura A., Radu A., Vasilescu V. G., Nastasie V., Antoniac V. I. et al. Dimensional Stability of SLA 3D-Printed Surgical Guide Resin After Steam Sterilization (121 °C and 134 °C) and Isopropyl Alcohol Disinfection: An In Vitro Study. *Dentistry Journal*. 2026;14(4):204. <https://doi.org/10.3390/dj14040204>
16. Alshammari S. M., Alhaddad A. J., Marghalani T. Y., Babeer W. A., Abuzinadah S. H. Dimensional Accuracy of a Sterilized and Disinfected 3D-Printed Surgical Guide: An In Vitro Study. *Microorganisms*. 2025;13(11):2457. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13112457>
17. Marturello D. M., Déjardin L. M. Post-sterilization Dimensional Accuracy of Methacrylate Monomer Biocompatible Three-Dimensionally Printed Mock Surgical Guides. *Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology*. 2023;36(6):279–286. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1768991>
18. Go H. B., Kim G. T., Yu J. H., Yoon Y., Kwon J. S. Clinical Implications of Sterilization Methods Applied to 3D-Printed Implant Surgical Guides: An In Vitro Study. *International dental journal*. 2026;76(2):109444. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2026.109444>
19. Yazigi C., Chaar M. S., Busch R., Kern M. The Effect of Sterilization on the Accuracy and Fit of 3D-Printed Surgical Guides. *Materials (Basel)*. 2023;16(15):5305. <https://doi.org/10.3390/ma16155305>
20. David S., Hüfner M., Rauch N., Kerberger R., Drescher D., Brunello G. et al. Impact of Autoclaving on the Dimensional Stability of 3D-Printed Guides for Orthodontic Mini-Implant Insertion — An In Vitro Study. *Clinical and experimental dental research*. 2025;11(1): e70111. <https://doi.org/10.1002/cre2.70111>
21. Gielisch M., Heimes D., Thiem D. G.E., Boesing C., Krumpholtz M., Al-Nawas B. et al. Steam-sterilized and degradable fused filament fabrication-printed polylactide/polyhydroxyalkanoate surgical guides for dental implants: Are they accurate enough for static navigation? *International journal of bioprinting*. 2022;9(2):655. <https://doi.org/10.18063/ijb.v9i2.655>
22. Rexin D., Avila D., Castillo A., Moreno K., Tan E., Limmeechokchai S. et al. C. E. Credit. Effect of Steam Sterilization on Accuracy of 3D Printed Implant Surgical Guides: A Pilot Study. *Journal of the California Dental Association*. 2024;52(1):2284931. <https://doi.org/10.1080/19424396.2023.2284931>
23. Burkhardt F., Handermann L., Rothlauf S., Gintaute A., Vach K., Spies B. C. et al. Accuracy of additively manufactured and steam sterilized surgical guides by means of continuous liquid interface production, stereolithography, digital light processing, and fused filament fabrication. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2024;152:106418. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106418>
24. González-Barnadas A., Ribas-García A., Jorba-García A., Figueiredo R., Valmaseda-Castellón E., Camps-Font O. Impact of Autoclaving on the Dimensional Stability of 3D-Printed Surgical Guides for Aesthetic Crown Lengthening. *Journal of Functional Biomaterials*. 2025;16(8):284. <https://doi.org/10.3390/jfb16080284>