На правах рукописи

Григорьев Михаил Петрович

ЛАБОРАТОРНАЯ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

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 РФ, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор **Лосев Федор Федорович**

Официальные оппоненты:

Олесова Валентина Николаевна - Заслуженный деятель науки РФ, 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.

Салеева Гульшат Тауфиковна - доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой ортопедической стоматологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Казанский государственный медицинский университет" 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 2026г. 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

Изготовление временных ортопедических конструкций является обязательным и критически важным этапом ортопедического лечения в современной стоматологической практике. Данные реставрации должны не только замещать дефекты зубных рядов на период изготовления постоянных конструкций, но и обеспечивать защиту пульпы препарированных зубов, поддерживать стабильность окклюзионных взаимоотношений, восстанавливать эстетику и жевательную функцию, а также удовлетворять эстетическим ожиданиям пациентов. Удовлетворенность пациентов на этом этапе во многом определяет их общий настрой на дальнейшее ортопедическое лечение.

Актуальность темы исследования обусловлена стремительным внедрением цифровых протоколов, таких как CAD/CAM-фрезерование и 3D-печать, которые постепенно вытесняют традиционные аналоговые методы. Однако стремительное развитие технологий опережает накопление научных данных о физико-механических и физико-химических свойствах новых материалов, что создает сложности при их обоснованном выборе в клинической практике.

Клиническая эффективность временных ортопедических конструкций напрямую зависит от их способности выдерживать значительные жевательные нагрузки и сохранять структурную целостность в агрессивной среде полости рта. Постоянный контакт с ротовой жидкостью инициирует процессы физико-химической деградации, где такие показатели, как водопоглощение и растворимость, становятся критическими факторами риска изменения цвета и биомеханического разрушения полимеров. Экспериментальные данные указывают на существенные различия в прочности и стабильности конструкций в зависимости от материала и технологии изготовления. Учитывая, что материалы для 3D-печати демонстрируют более высокие уровни водопоглощения по сравнению с фрезерованными аналогами, возникает острая необходимость в научно обоснованном выборе между различными цифровыми технологиями и составами материалов для обеспечения прогнозируемого результата лечения в различных клинических ситуациях.

Таким образом, сравнительная оценка современных стоматологических полимеров по критериям прочности, микротвердости и устойчивости к влажной среде является необходимым условием для совершенствования алгоритмов ортопедического лечения с применением временных конструкций и повышения качества жизни пациентов на этапах комплексной реабилитации.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы совершенствования ортопедического лечения с применением временных конструкций и изучения свойств полимерных материалов традиционно находятся в центре внимания отечественных и зарубежных исследователей. Фундаментальные основы стоматологического материаловедения, заложенные в классических трудах К. Дж. Анусависа (K.J. Anusavice, 2013) и А.И. Рыбакова (1984), создали базу для понимания поведения полимеров в полости рта.

Развитие цифровых протоколов — CAD/CAM-фрезерования и 3D-печати — достаточно подробно освещено в современной литературе (R. van Noort, 2012; M. Patil и соавт., 2018; Ф.Ф. Лосев и соавт., 2023). Проведены многочисленные исследования прочности (Çakmak G. и соавт., 2023; Lawson N.C. и соавт., 2024), водопоглощения и растворимости (Dimitrova M. и соавт., 2023; Azab M.M. и соавт., 2025) материалов для разных технологий.

В то же время, в научной литературе отсутствуют комплексные исследования, в которых на единой методологической основе проводилось бы сравнение ключевых физико-механических (прочность при сжатии, микротвердость) и физико-химических (водопоглощение, растворимость) параметров материалов, представляющих все три основных технологических направления: субтрактивное (CAD/CAM), аддитивное (3D-печать) и традиционные аналоговые методы. Особенно мало данных о поведении этих материалов в динамике — при переходе от одиночных конструкций к мостовидным, а также при воздействии влажной среды, имитирующей полость рта. Данное обстоятельство подтверждает актуальность и необходимость проведения настоящего диссертационного исследования.

Цель исследования

Провести сравнительную оценку физико-механических и физико-химических свойств современных полимерных материалов, используемых для изготовления временных ортопедических конструкций методами CAD/CAM-фрезерования и 3D-печати, в сравнении с традиционными аналоговыми материалами, для научного обоснования их выбора в клинической практике.

Задачи исследования

1. На основании анализа современных отечественных и зарубежных литературных источников систематизировать данные о свойствах полимерных материалов, применяемых для изготовления временных ортопедических конструкций по различным технологиям.
2. В ходе лабораторного эксперимента провести сравнительную оценку физико-химических свойств (водопоглощение и растворимость) полимерных материалов для CAD/CAM-фрезерования, 3D-печати и традиционных методов в соответствии с требованиями национальных стандартов (ГОСТ Р 71412–2024).
3. Изучить динамику изменения поверхностной микротвердости исследуемых полимерных материалов при контакте с водной средой, имитирующей ротовую жидкость, для оценки их устойчивости к изнашиванию.
4. Определить прочностные характеристики (разрушающую нагрузку при сжатии) одиночных коронок и мостовидных конструкций, изготовленных из исследуемых материалов по различным технологиям, и выявить закономерности влияния технологии и геометрии конструкции на механическую надежность.
5. Разработать практические рекомендации по дифференцированному выбору полимерных материалов и цифровых методов изготовления временных ортопедических конструкций в зависимости от планируемого срока их клинической эксплуатации и ожидаемых жевательных нагрузок.

Научная новизна исследования

Настоящее исследование вносит следующий вклад в развитие стоматологического материаловедения и практической ортопедической стоматологии.

Впервые проведен комплексный сравнительный анализ физико-механических и физико-химических свойств полимерных материалов, представляющих субтрактивное (фрезерованный ПММА «Huge PMMA»), аддитивное (фотополимер «Dental Sand Pro») и традиционное аналоговое производство («Синма-М» и «Темпокор»), что позволило получить системные данные о влиянии способа производства на эксплуатационные характеристики материалов.

Впервые установлен дифференцированный характер изменения поверхностной микротвердости полимерных материалов при длительном контакте с водной средой в зависимости от технологии их изготовления. Показано, что фрезерованный ПММА демонстрирует стабильность показателя, аддитивные материалы характеризуются статистически значимым снижением твердости вследствие пластифицирующего действия водной среды, а традиционные акриловые пластмассы с ручным замешиванием сохраняют формально приемлемые значения твердости на фоне критической растворимости, что свидетельствует о различных механизмах поверхностной деструкции.

Впервые на основании сравнительных испытаний одиночных коронок и мостовидных конструкций, выполненных по идентичным цифровым шаблонам, доказано, что снижение несущей способности при переходе от одиночных реставраций к протяженным конструкциям имеет разную выраженность в зависимости от технологии изготовления. Для аддитивных материалов выявлено многократное падение прочности мостовидных конструкций по сравнению с одиночными коронками, что связано с недостаточной межслойной адгезией в условиях изгибающих нагрузок. Для фрезерованного ПММА данное снижение выражено в значительно меньшей степени благодаря изотропности свойств.

Впервые выявлена обратная корреляция между показателями водопоглощения и растворимости у материалов различных технологических групп, что позволило идентифицировать два различных механизма деградации полимеров в водной среде: пластификацию полимерной матрицы за счет сорбции жидкости (характерно для 3D-печатных материалов) и вымывания низкомолекулярных фракций из поверхностных слоев (характерно для традиционных акриловых пластмасс с ручным замешиванием). Научно обосновано, что наибольшей физико-химической стабильностью обладает фрезерованный ПММА, в котором оба механизма деструкции минимизированы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в расширении и углублении научных представлений о взаимосвязи технологии изготовления, структуры и эксплуатационных характеристик современных полимерных материалов, используемых для временных

ортопедических конструкций. Проведенное исследование вносит вклад в стоматологическое материаловедение, систематизируя и дополняя данные о физико-механических (прочность при сжатии) и физико-химических (водопоглощение, растворимость) свойствах материалов, представляющих три ключевых технологических направления.

В работе впервые на единой методологической основе выполнен комплексный сравнительный анализ, позволивший выявить закономерности, определяющие клиническое поведение материалов. Установлено, что, несмотря на сопоставимые исходные значения микротвердости, материалы демонстрируют разнонаправленную динамику изменения свойств под воздействием факторов, имитирующих среду полости рта. Научно обоснована корреляция между повышенным водопоглощением и снижением микротвердости у материалов для 3D-печати, что указывает на преобладание пластифицирующего эффекта водной среды. В свою очередь, для традиционных акриловых пластмасс, изготавливаемых методом ручного смешивания, выявлен иной механизм деградации, характеризующийся высокой растворимостью при относительно низком водопоглощении, что свидетельствует о вымывании низкомолекулярных компонентов.

Полученные количественные данные о пределе прочности одиночных коронок и мостовидных конструкций позволяют прогнозировать надежность конструкций при различных видах функциональной нагрузки. В частности, доказанное значительное превосходство фрезерованного ПММА по показателям несущей способности, особенно в условиях изгибающих нагрузок, служит основанием для рекомендации данного класса материалов как приоритетного при долгосрочном временном протезировании и в клинических ситуациях с высокими жевательными нагрузками. Выявленные ограничения прочности материалов для 3D-печати при изготовлении протяженных конструкций позволяют определить границы их эффективного клинического применения, преимущественно для одиночных реставраций при краткосрочном лечении.

Результаты исследования физико-химической стабильности материалов имеют непосредственное значение для обеспечения биосовместимости и долговечности реставраций. Установленное превышение показателей растворимости у традиционных пластмасс с ручным замешиванием обосновывает нецелесообразность их применения для длительного контакта с тканями полости рта.

Методология и методы исследования

Методологическую основу исследования составляет комплексный экспериментальный подход, предполагающий сочетание методов лабораторного материаловедения и статистического анализа для оценки физико-механических и физико-химических свойств полимерных материалов.

Исследование проведено на 4 группах полимерных материалов (n=10 на каждый вид испытаний), представляющих различные технологии изготовления:

- Группа I – фрезерованный полиметилметакрилат (ПММА) Huge PMMA Monolayer (CAD/CAM);

- Группа II – керамонаполненный фотополимер Dental Sand Pro (3D-печать);
- Группа III – акриловая пластмасса горячего отверждения Синма-М (традиционная технология с ручным замешиванием);
- Группа IV – композитный материал двойного отверждения Темпокор (традиционная технология с автоматическим смешиванием).

Для оценки физико-химических свойств (водопоглощение и растворимость) изготавливались образцы в виде дисков в строгом соответствии с ГОСТ Р 71412–2024 (ИСО 10477:2020). Испытания на прочность при сжатии проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z010 с использованием одиночных коронок резцов, моляров и мостовидных конструкций, изготовленных по единому цифровому шаблону. Исследование микротвердости по Виккерсу (нагрузка 25 г, время выдержки 15 с) выполнялось на микротвердомере Duramin-20 (Struers, Дания) для образцов в сухом состоянии и после 7-суточной выдержки в дистиллированной воде.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием t-критерия Стьюдента для количественных показателей (M ± SD). Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Технология изготовления и структурная гомогенность полимерной матрицы определяют эксплуатационную надежность временных ортопедических конструкций. Фрезерованный ПММА (CAD/CAM) обеспечивает максимальную стабильность физико-механических и физико-химических свойств в водной среде, тогда как анизотропия материалов для 3D-печати и гетерогенность традиционных пластмасс с ручным замешиванием приводят к повышенному водопоглощению, пластификации или критической растворимости.
2. Прочность мостовидных конструкций из материала для 3D-печати снижается в 3 раза по сравнению с одиночными коронками из-за недостаточной межслойной адгезии в условиях изгибающих нагрузок, что ограничивает применение аддитивных технологий при замещении протяженных дефектов. Для фрезерованного ПММА данное снижение выражено в значительно меньшей степени.
3. Исходная микротвердость не является прогностическим критерием долговечности материала. Фрезерованный ПММА сохраняет твердость во влажной среде, материал для 3D-печати демонстрирует ее статистически значимое снижение (на 12,4%) вследствие пластификации, а традиционные материалы с ручным замешиванием, несмотря на сохранение твердости, характеризуются критической растворимостью, указывающей на скрытую деградацию поверхности.

Степень достоверности и апробация полученных результатов

Достоверность проведенного исследования определяется достаточным объемом экспериментальных данных (изучено 4 группы материалов, по 10 образцов для каждого вида

испытаний), использованием сертифицированного оборудования и современных методов исследования в строгом соответствии с требованиями национальных стандартов (ГОСТ Р 71412–2024, ИСО 10477:2020). Уровень статистической значимости $p<0,05$. Полученный массив данных был статистически обработан с использованием программ MS Excel и «Statistica» 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 хирургической 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 ортопедической стоматологии и гнатологии ФГБУ НМИЦ «ЦНИИСиЧЛХ» Минздрава России. Полученные в ходе исследования данные используются при обучении врачей-ординаторов, курсантов и аспирантов, а также в системе непрерывного медицинского образования при подготовке и повышении квалификации врачей стоматологов-ортопедов и зубных техников.

Личный вклад автора

Автором определены цель и задачи исследования, разработан дизайн экспериментального исследования. Проведён анализ современных отечественных и зарубежных источников литературы по проблеме применения полимерных материалов в ортопедической стоматологии.

Автор лично участвовал в изготовлении экспериментальных образцов с использованием технологий CAD/CAM-фрезерования и 3D-печати, проводил лабораторные испытания физико-механических и физико-химических характеристик материалов на сертифицированном оборудовании, осуществлял статистическую обработку и анализ полученных данных.

Текст диссертационной работы, включая разделы, посвящённые результатам исследования, обсуждению полученных данных и обобщающим выводам, написан автором лично.

Публикации

По материалам исследования опубликовано 3 печатные работы, все в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа изложена на 123 страницах машинописного текста, содержит 18 рисунков, 5 таблиц. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, глав «Материалы и методы», «Результаты собственных исследований», «Обсуждение полученных результатов», выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и списка литературы, который содержит 164 источника (42 отечественных и 122 зарубежных).

Содержание работы

Материалы и методы исследования

Изготовление временных ортопедических конструкций является обязательным и критически важным этапом ортопедического лечения. Временные реставрации должны не только замещать дефекты зубных рядов на период изготовления постоянных конструкций, но и обеспечивать защиту пульпы препарированных зубов, поддерживать стабильность окклюзионных взаимоотношений и удовлетворять эстетическим ожиданиям пациентов. Выбор материала для временных конструкций, обладающего оптимальным сочетанием физико-механических и физико-химических свойств, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Исследование выполнено на базе отдела ортопедической стоматологии и гнатологии ФГБУ НМИЦ «ЦНИИС и ЧЛХ» Минздрава России. Лабораторные испытания проводились на сертифицированном оборудовании в соответствии с требованиями национальных стандартов.

Для проведения сравнительной оценки физико-механических и физико-химических свойств полимерных материалов в лабораторных условиях было изготовлено и исследовано 4 группы материалов, представляющих различные технологические подходы к изготовлению временных ортопедических конструкций: метод компьютерного фрезерования (CAD/CAM), метод аддитивного производства (3D-печать) и традиционные аналоговые методы. Основное внимание было уделено четырем ключевым группам, соответствующим основным клиническим подходам, приведенным в таблице 1.

Все экспериментальные образцы изготавливались с использованием единого цифрового протокола для обеспечения геометрической идентичности исследуемых объектов.

Характеристика исследуемых материалов

Полиметилметакрилат HUGE PMMA Monolayer (Huge, Китай) представляет собой готовый блок в форме диска диаметром 98 мм и толщиной 18 мм, предназначенный для обработки по технологии CAD/CAM. Материал изготовлен на основе полиметилметакрилата (ПММА). Керамонаполненный композит HARZ Labs Dental Sand Pro (HARZ Labs, Россия) позиционируется как современный фотополимер для аддитивного производства. Материал представляет собой керамонаполненный фотополимер, предназначенный для 3D-печати временных ортопедических конструкций и мостовидных конструкций. Стоматологическая пластмасса Синма-М (Стома) представляет собой порошок суспензионный привитой фтор-

содержащий сополимер. Композитный материал «Темпокор» (ВладМиВа, Россия) является полимерным композитом на основе многофункциональных метакрилатов, предназначенным для изготовления временных ортопедических конструкций.

Методы изготовления экспериментальных образцов

Методы субтрактивных и аддитивных технологий. Метод изготовления экспериментальных образцов (одиночные коронки резцов, моляров и мостовидные конструкции на 3 единицы) базировался на применении цифрового протокола, что позволило обеспечить полную геометрическую идентичность всех исследуемых объектов и минимизировать погрешности, характерные для традиционных аналоговых методов изготовления. Для реализации задач исследования выбраны две современные технологические цепочки: субтрактивное производство (фрезерование по технологии CAD/CAM) и аддитивное производство (3D-печать).

Таблица 1. Клинические группы

№ группы	Материал	Технология изготовления
Группа I	Полиметилметакрилат HUGE PMMA Monolayer (Huge, Китай) 	CAD/CAM-фрезерование (субтрактивная)
Группа II	Керамонаполненный композит HARZ Labs Dental Sand Pro (HARZ Labs, Россия) 	3D-печать (аддитивная)
Группа III	Стоматологическая пластмасса Синма-М (Стома) 	Традиционная аналоговая (горячая полимеризация, ручное замешивание)
Группа IV	Композитный материал «Темпокор» (ВладМиВа, Россия) 	Традиционная аналоговая (двойное отверждение, автоматическое смешивание)

Процесс создания образцов начинался с разработки единых виртуальных трехмерных моделей в специализированном стоматологическом программном обеспечении. Спроектированы три типа конструкций, наиболее часто встречающиеся в клинической практике: одиночные коронки для фронтальной группы зубов (верхний боковой резец), одиночные коронки для жевательной группы зубов (первый моляр нижней челюсти) и мостовидные конструкции протяженностью в три единицы с опорой на премоляры и промежуточной частью, замещающей отсутствующий зуб. После завершения этапа моделирования полученные STL-файлы передавались на соответствующие производственные модули.

При изготовлении образцов методом CAD/CAM использовался пятиосевой стоматологический фрезерный станок MC X5 (Sirona, inLab).

При аддитивном производстве применялся метод стереолитографии (SLA) на 3D-принтере Asiga MAX 2 (Австралия), при котором образцы выращивались послойно из жидкой композиции Dental Sand Pro (HARZ Labs, Россия) под воздействием УФ-излучения (длина волны 405 нм, толщина слоя 50 мкм). После печати образцы промывали в изопропиловом спирте в течение 5 минут в ультразвуковой ванне для удаления незаполимеризованного слоя, затем высушивали на воздухе. Окончательную постполимеризацию проводили в УФ-камере при длине волны 405 нм в течение 20 минут при температуре 23±2 °C. Выбор режима обусловлен рекомендациями производителя материала и данными литературы о влиянии параметров постполимеризации на механические свойства. Все изготовленные образцы проходили стадию финишной обработки, включавшую удаление поддержек и полировку с использованием последовательности абразивных бумаг с уменьшающимся размером зерна до 4000 для удаления поверхностных дефектов, способных повлиять на результаты измерений.

Аналоговые методы изготовления ортопедических конструкций. Методика изготовления аналоговой группы образцов (Синма-М и Темпокор) основывалась на использовании традиционных зуботехнических методик.

Полимеризацию материала Синма-М проводили на водяной бане в гипсовой форме. Порошок и жидкость смешивали в соотношении 3:1 по объему, полученную смесь оставляли для набухания в течение 6 мин и затем формировали из нее образцы в гипсовой форме в кювете в комнатных условиях. Полимеризацию проводили на водяной бане, нагревая ее за 30-40 мин до кипения и выдерживая при этих условиях 45 мин, после чего нагрев прекращали и охлаждали кювету до комнатной температуры.

Образцы из материала «Темпокор» готовили в форме для дисков, заполняя форму в комнатных условиях смешанным из шприцов картриджа материалом, с последующей полимеризацией смешанной композиции при температуре (37 ± 1) °C в течение 2–2,5 мин и окончательной полимеризации в комнатных условиях в течение 5-7 мин.

По завершении отверждения образцы извлекались из форм, подвергались механической обработке твердосплавными фрезами для удаления слоя и полировались с использованием специализированных паст до достижения гладкой, зеркальной поверхности.

Методы лабораторных испытаний

Определение прочностных характеристик методом сжатия. Для оценки механической надежности временных ортопедических конструкций проводились испытания на статическое сжатие. Данный метод позволяет имитировать воздействие жевательной нагрузки и определить предел прочности конструкций, изготовленных из различных материалов и по разным технологиям. Испытания проводились на универсальной испытательной машине

Zwick/Roell Z010 (Германия) (рисунок 1), оснащенной датчиком силы и программным обеспечением для фиксации параметров разрушения в режиме реального времени.

Экспериментальные образцы (одиночные коронки резцов, моляров и мостовидные конструкции на 3 единицы) жестко фиксировались на соответствующих полимерных моделях-основаниях. Для мостовидных конструкций обеспечивалось отсутствие опоры в области промежуточной части для создания условий нагрузки на изгиб. Модель с закрепленным образцом устанавливалась на нижнюю опорную плиту испытательной машины. Нагрузка прикладывалась вертикально вдоль оси зуба. Индентор подводился к окклюзионной поверхности моляров или к режущему краю резцов. Нагрузка осуществлялась с постоянной скоростью 10 мм/мин до момента полной потери целостности (разрушения) образца (рисунки 2, 3). Испытание коронок резцов проводили путем вертикальной нагрузки режущего края. Такая схема имитирует нагрузку при откусывании пищи и позволяет оценить прочность передней группы зубов.

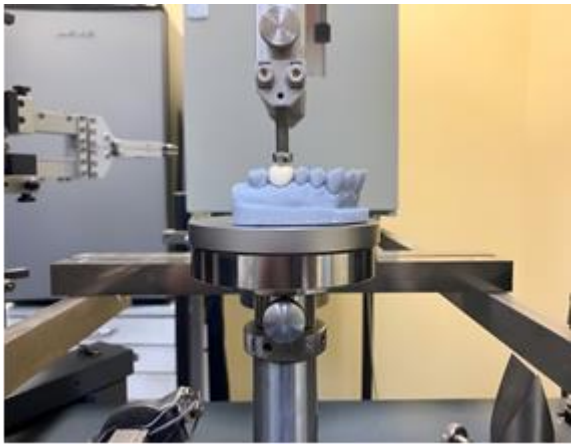


Рисунок 1. Устройство для испытания на статическое сжатие, установленное в испытательной машине Zwick/Roell Z010 (Zwick, Германия).



Рисунок 2. Приложение нагрузки на медиально-небный бугор моляра в испытательной машине Zwick/Roell Z010 (Германия



Рисунок 3. Испытание коронки второго резца: приложение нагрузки на режущий край по оси зуба.



Рисунок 4. Разрушенная мостовидная ортопедическая конструкция в испытательной машине после приложения нагрузки на зуб 15 в мостовидной конструкции.

В каждой группе испытывалось по 20 идентичных образцов. Фиксировалось максимальное усилие (в Ньютонах, Н), при котором происходило образование трещин или сколов. Характерный вид разрушения мостовидной конструкции из материала для 3D-печати после проведения испытания на сжатие представлен на рисунке 4. Разрушение происходит в области промежуточной части (в проекции зуба 15), что подтверждает корректность выбранной схемы нагрузки с созданием свободного пространства под фасеткой — изгиб является основным механизмом, лимитирующим прочность таких конструкций.

Исследование водопоглощения и растворимости. В соответствии с действующим национальным стандартом ГОСТ Р 71412–2024 (ИСО 10477:2020), из каждого материала были изготовлены образцы в виде дисков (рисунок 5). Всего было изготовлено по 10 образцов на каждый материал (Huge PMMA, Dental Sand Pro, Темпокор и Синма-М). Размеры образцов для каждого материала представлены в таблице 2.

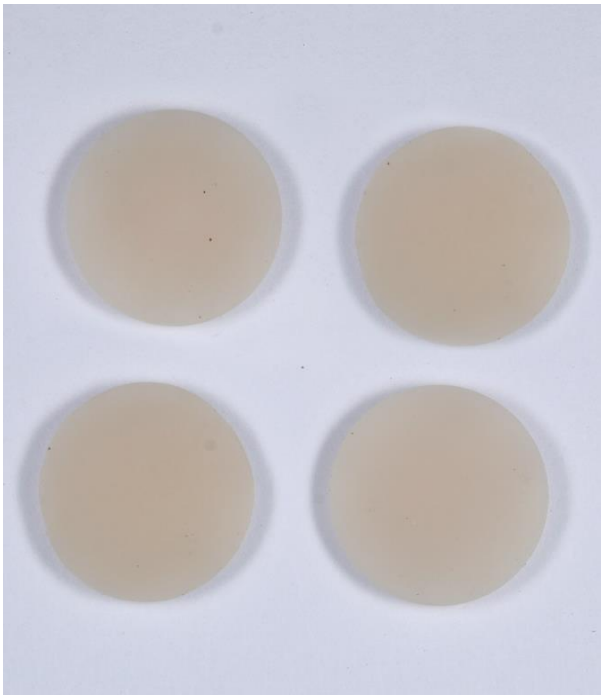


Рисунок 5. Полимерные диски для исследования показателей водопоглощения и растворимости

Для образцов по технологии CAD/CAM из диска Huge PMMA образцы были изготовлены фрезерованием на фрезерном станке MC X5 (Sirona, inLab). Образцы из материала Dental Sand Pro готовили путем послойного формирования на 3D-принтере Asiga MAX 2 с последующей дополнительной обработкой. Полимеризацию материала Синма-М проводили на водяной бане в гипсовой форме. Образцы из материала «Темпокор» готовили в форме для дисков с последующей полимеризацией.

Подготовленные образцы подвергали предварительной сушке для установления стабильной начальной массы. Процедуру проводили в эксикаторе с силикагелем при температуре (37 ± 1) °С. Первое контрольное взвешивание каждого образца проводили через 24 часа. Процедуру сушки продолжали до тех пор, пока потеря массы каждого испытуемого образца не составит менее 0,1 мг в течение каждого 24-часового периода взвешивания, и конечную массу записывали как m_1.

Таблица 2. Показатели водопоглощения и растворимости для материалов Huge PMMA, Dental Sand Pro, Синма-М и Темпокор (M±SD)

Материал	Водопоглощение (ρW), мкг/мм³	Растворимость (ρs), мкг/мм³
Huge PMMA (CAD/CAM)	26,76 ± 1,70	0,78 ± 0,16
Dental Sand Pro (3D-печать)	40,04 ± 1,59	4,32 ± 1,44
Синма-М	24,05 ± 2,65	11,21 ± 3,17
Темпокор	38,80 ± 4,22	4,92 ± 1,51

Для определения показателей водопоглощения и растворимости образцы помещали в дистиллированную воду и в термостат температурой (37 ± 1) °C и выдерживали при этих условиях в течение 7 дней ± 4 ч. По окончании выдержки каждый образец удаляли из дистиллированной воды, промывали, остатки воды удаляли фильтровальной бумагой, после чего образец взвешивали через 1 мин после извлечения из воды. Полученную массу образца, соответствующую его массе с поглощенной водой, обозначали m_2.

После определения массы m_2 образцы вновь подвергали процедуре высушивания до достижения постоянной массы m_3.

Для каждого из образцов рассчитывали показатель водопоглощения ρW, мкг/мм³, и растворимость ρs, мкг/мм³, по формулам:

$$\rho W = (m_2 - m_3) / V$$
$$\rho s = (m_1 - m_3) / V$$

где m_1 — начальная масса высушенного образца, мкг; m_2 — масса образца после выдержки в воде, мкг; m_3 — масса высушенного образца после выдержки в воде, мкг; V — объем образца, мм³.

Метод определения микротвердости. Для оценки влияния водной среды на микротвердость образцы каждого материала (Huge PMMA, Dental Sand Pro, Темпокор и Синма-М) разделили на две группы. Первую группу (сухие образцы) подвергали предварительной сушке до постоянной массы в эксикаторе с силикагелем при температуре 37±1°C по описанной выше методике. Вторую группу (влажные образцы) после аналогичной сушки помещали в дистиллированную воду и выдерживали в термостате при 37±1°C в течение 7 суток.

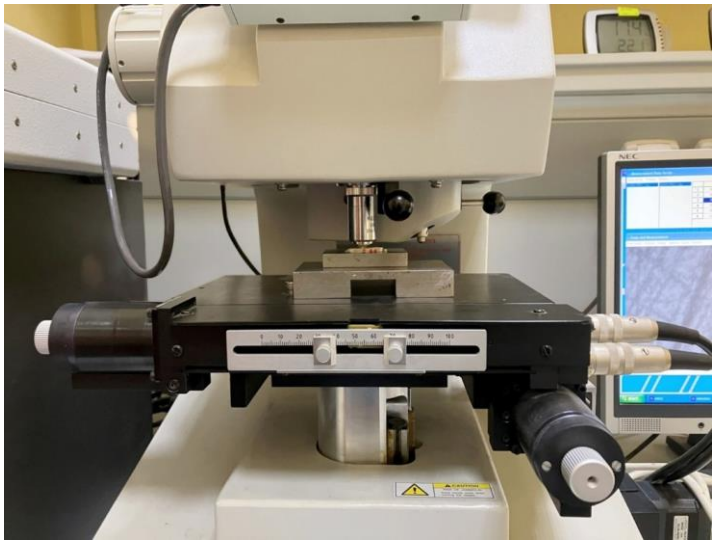


Рисунок 6. Микротвердомер Duramin-20 (Struers, Дания)

Измерения микротвердости выполняли на микротвердомере Duramin-20 (Struers, Дания) методом Виккерса (рисунок 6). Нагрузка на индентор составляла 25 г, время выдержки под нагрузкой — 15 секунд. На каждом образце наносили не менее шести отпечатков, располагая их на достаточном удалении друг от друга и от краев образцов. Измерение диагоналей отпечатков проводили автоматически и с ручной коррекцией с использованием встроенного программного обеспечения прибора при увеличении объектива 40×. По результатам измерений для каждого отпечатка рассчитывали значение твердости в единицах HV. Для каждого материала и каждого состояния (сухое и влажное) исследовали по 10 образцов.

Статистическая обработка данных. Статистическая обработка данных проводилась с использованием стандартного пакета статистического анализа. Для количественных показателей, представленных в виде M ± SD (среднее значение ± стандартное отклонение), проводи-

лась оценка достоверности различий с помощью t-критерия Стьюдента. Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты собственных исследований и их обсуждение

Проведённое комплексное лабораторное исследование с включением четырех групп полимерных материалов (группа I: фрезерованный ПММА «Huge PMMA»; группа II: керамонаполненный фотополимер для 3D-печати «Dental Sand Pro»; группа III: акриловая пластмасса горячего отверждения «Синма-М»; группа IV: композитный материал двойного отверждения «Темпокор») позволило выявить четкую зависимость физико-механических и физико-химических характеристик временных ортопедических конструкций от технологии изготовления и состава полимерного материала.

Ключевым критерием пригодности полимерных материалов для изготовления временных ортопедических конструкций служит их способность сохранять заданные свойства в условиях, максимально приближенных к полости рта. Основными факторами, определяющими долговечность таких конструкций, являются устойчивость к механическим нагрузкам и стабильность структуры при постоянном контакте с влажной средой.

Результаты испытания образцов на водопоглощение и растворимость

Одним из ключевых критериев, определяющих пригодность полимерных материалов для изготовления временных ортопедических конструкций, является их физико-химическая стабильность в условиях, имитирующих среду полости рта. Постоянный контакт с ротовой жидкостью инициирует в полимерной матрице процессы сорбции и десорбции, которые могут приводить к необратимым изменениям структуры, снижению механических характеристик и ухудшению эстетических свойств. В этой связи оценка показателей водопоглощения и растворимости рассматривается как обязательный этап доклинических испытаний, позволяющий прогнозировать долговременное поведение материала в клинических условиях.

Полученные в сравнительных испытаниях количественные показатели водопоглощения и растворимости для всех исследуемых групп материалов систематизированы и представлены в таблице 2. Приведенные данные сопровождаются расчетом средних арифметических значений и стандартных отклонений, что позволяет оценить как абсолютные величины исследуемых параметров, так и степень воспроизводимости свойств внутри каждой группы.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют четко выраженные и статистически достоверные различия в поведении исследуемых материалов при контакте с водной средой. Количественный анализ с применением t-критерия Стьюдента подтвердил наличие значимых межгрупповых различий ($p < 0,05$) как по показателю водопоглощения (ρW), так и по показателю растворимости (ρS).

Наиболее высокий средний показатель водопоглощения был зафиксирован у материала аддитивной технологии Dental Sand Pro, составивший $40,04 \pm 1,59$ мкг/мм³. Это значение практически достигает верхнего допустимого предела в 40 мкг/мм³, установленного ГОСТ Р

71412–2024, и в 1,5 раза превышает соответствующий показатель для CAD/CAM-материала Huge PMMA (26,76 ± 1,70 мкг/мм³). Столь высокое водопоглощение композита для 3D-печати, вероятно, обусловлено особенностями его химического состава и микроструктуры, сформированной в процессе послойного фотоотверждения и последующей дополнительной постполимеризации. Повышенная склонность к абсорбции воды может служить косвенным признаком наличия в полимерной сетке свободного объема, способствующего диффузии молекул воды, что в долгосрочной перспективе способно инициировать процессы набухания, генерации внутренних напряжений и снижения механической прочности.

Материал для традиционного аналогового метода Синма-М, напротив, показал средний показатель водопоглощения — 24,05 ± 2,65 мкг/мм³, что оказалось даже несколько ниже, чем у фрезерованного ПММА Huge PMMA. Однако ключевым результатом, определяющим клиническую пригодность данного материала, явился показатель его растворимости. Среднее значение растворимости для материала Синма-М составило 11,21 ± 3,17 мкг/мм³, что в 1,5 раза превышает установленный норматив (7,5 мкг/мм³) и выше показателей материалов цифровых технологий. Так, значение ρS для Синма-М в 14,4 раза выше, чем у Huge PMMA (0,78 ± 0,16 мкг/мм³), и в 2,6 раза выше, чем у Dental Sand Pro (4,32 ± 1,44 мкг/мм³). Столь высокая растворимость указывает на значительное вымывание низкомолекулярных компонентов, прежде всего остаточных мономеров, из объема материала. Наличие в структуре полимерной матрицы Синма-М значительного количества низкомолекулярных продуктов, по-видимому, заполняет свободный объем, что и обусловливает его низкое водопоглощение. Процесс вымывания остаточных мономеров и других низкомолекулярных продуктов из материала Синма-М не только ослабляет структурную целостность полимерной реставрации, но и создает потенциальные риски для биосовместимости вследствие выделения в ротовую полость синтетических органических соединений.

Полимерный композитный материал на основе многофункциональных метакрилатов Темпокор, применяемый на практике также, как и материал Синма-М, по традиционной аналоговой технологии, показал в результате испытаний вполне удовлетворительные значения водопоглощения и растворимости, отвечающие требованиям действующего стандарта. Можно заключить, что положительные результаты, полученные в испытании материала Темпокор, обеспечены двойным механизмом его отверждения, а также применением для смешивания основных компонентов картриджа с двумя шприцами, содержащего раздельно две реагирующие пасты, что обеспечивает строгое соотношение компонентов при инициировании процесса полимеризации.

Важно отметить, что все исследуемые материалы уложились в нормативные требования ГОСТ Р 71412–2024 по показателю водопоглощения (не более 40 мкг/мм³). Однако если Huge PMMA (26,76 мкг/мм³) и Синма-М (24,05 мкг/мм³) демонстрируют значения с большим запасом, то материал Dental Sand Pro (40,04 мкг/мм³) находится на предельно допустимом уровне. Это означает, что даже незначительное отклонение в технологии постобработки

(недостаточная полимеризация) или изменение состава партии материала может привести к превышению нормы, что делает его клиническое применение более чувствительным к соблюдению протокола производителя.

По показателю растворимости ситуация иная. Нормативу (менее 7,5 мкг/мм³) соответствуют фрезерованный ПММА Huge PMMA, композит Темпокор и материал для 3D-печати Dental Sand Pro. Однако Dental Sand Pro, при формальном соответствии, демонстрирует значения, близкие к верхней границе нормы, что в сочетании с высоким водопоглощением создает риск вымывания компонентов при длительной эксплуатации. Критическое превышение растворимости у материала Синма-М (в 1,5 раза выше нормы) позволяет предположить наличие в его структуре значительной фракции низкомолекулярных олигомеров, не встроенных в полимерную сетку, что является прямым следствием ручного смешивания компонентов и неконтролируемых условий полимеризации.

Выявленная обратная корреляция между водопоглощением и растворимостью у материалов Синма-М и Dental Sand Pro заслуживает отдельного внимания. Низкое водопоглощение Синма-М, вероятно, обусловлено заполнением его свободного объема остаточными мономерами и олигомерами, которые впоследствии вымываются, что и фиксируется как высокая растворимость. У Dental Sand Pro, напротив, свободный объем исходно больше и доступен для воды, что дает высокое водопоглощение, но при этом слабосвязанные компоненты частично уже удалены в процессе постобработки, поэтому растворимость ниже. Стабильность Huge PMMA обеспечивается отсутствием обоих негативных факторов: малый свободный объем и минимум вымываемых компонентов.

Углубленный анализ индивидуальных значений водопоглощения внутри каждой группы позволяет выявить дополнительные закономерности, имеющие значение для контроля качества. Так, в группе Huge PMMA (CAD/CAM) разброс значений составил от 23,7 до 29,0 мкг/мм³, что при низком среднем значении указывает на высокую воспроизводимость свойств заводских блоков. В группе Dental Sand Pro (3D-печать) при среднем значении 40,04 мкг/мм³ отдельные образцы показали значения, превышающие нормативные 40 мкг/мм³, что свидетельствует о том, что даже в рамках одной экспериментальной серии, изготовленной с соблюдением протокола, материал для 3D-печати может демонстрировать пограничные или неудовлетворительные результаты. Данный факт подчеркивает высокую чувствительность аддитивной технологии к микроизменениям условий постобработки (температура, время, мощность УФ-источника) и требует более жесткого контроля на этапе финишной полимеризации в лабораторных условиях.

Дополнительный анализ вариабельности полученных данных (величины стандартного отклонения) позволяет оценить такой важный для клинической практики параметр, как технологическая надежность материала. Наименьший разброс значений водопоглощения зафиксирован у материала Dental Sand Pro (σ=1,59 мкг/мм³), что на первый взгляд говорит о стабильности аддитивного

процесса. Однако этот материал находится на пределе нормативных значений, и любое неконтролируемое отклонение (например, падение мощности лампы в пост-полимеризаторе) приведет к браку. Наибольшая вариабельность водопоглощения отмечена у материала «Темпокор» (σ=4,22 мкг/мм³). Учитывая, что это материал для прямого клинического применения, замешиваемый врачом вручную через картридж, такой разброс следует признать допустимым, но он подчеркивает чувствительность результата к тщательности смешивания и условиям отверждения в полости рта. Что касается растворимости, то здесь безусловным лидером по стабильности является фрезерованный ПММА (σ=0,16 мкг/мм³), тогда как огромный разброс у материала Синма-М (σ=3,17 мкг/мм³) окончательно подтверждает, что даже в пределах одной лабораторной серии невозможно получить прогнозируемый результат, что в клинике будет означать риск осложнений.

Результаты исследования микротвердости

Исследование микротвердости проведено с целью оценки устойчивости поверхностного слоя исследуемых материалов к локальному деформированию, что является важным критерием, определяющим их износостойкость и способность сохранять гладкость поверхности в процессе эксплуатации. Поскольку микротвердость чувствительна к изменениям в структуре полимерной матрицы (степени сшивки, наличию непрореагировавших компонентов), ее анализ в динамике — до и после водного воздействия — позволяет косвенно оценить интенсивность деструктивных процессов, протекающих в материале при контакте с влажной средой.

Анализ результатов показывает, что в исходном сухом состоянии все исследованные материалы обладают близкими значениями твердости, которые укладываются в диапазон от 19 до 22 HV. Наиболее высокий показатель установлен для материала Huge PMMA, изготовленного по технологии CAD/CAM. Незначительно отличается показатель начальной твердости сухих образцов композита Dental Sand Pro для 3D-печати и акриловой пластмассы традиционной аналоговой технологии Синма-М. При этом наименьшая вариабельность результатов в сухой группе отмечена именно для материалов традиционной технологии Синма-М (V = 8,1 %) и Темпокор (V = 4,8 %), что свидетельствует о достаточной гомогенности этих материалов, получаемых по традиционной технологии изготовления. Материал холодного отверждения Темпокор, предназначенный для прямого клинического применения, в сухом состоянии показал микротвердость 19,72 HV, что на 9 % ниже значений, полученных для других материалов.

Таблица 3. Показатели микротвердости (HV) исследуемых материалов (M±SD)

Материал	Сухое состояние	После выдержки в водной среде	Изменение, %
Huge PMMA (CAD/CAM)	22,44 ± 3,25	20,92 ± 0,88	-6,8%
Dental Sand Pro (3D-печать)	21,47 ± 3,21	18,80 ± 2,93	-12,4%
Синма-М	21,07 ± 1,70	20,39 ± 0,72	-3,2%
Темпокор	19,72 ± 1,06	16,37 ± 1,34	-17,0%

Следует отметить статистически значимые ($p < 0,05$) изменения показателя твердости после выдержки образцов в водной среде (Таблица 3). Наиболее стабильное поведение продемонстрировали материалы Huge PMMA и Синма-М, снижение среднего значения микротвердости после воздействия водной среды для этих материалов составило от 3 % до 7 %. После воздействия

водной среды разброс показателей твердости для этих материалов существенно сокращается (коэффициент вариации = 3,5–4,2), что указывает на выравнивание поверхностных свойств образцов. Такую устойчивость можно объяснить высокой степенью конверсии мономеров, достигнутой в условиях промышленного производства заготовок материала Huge PMMA и горячей полимеризации аналогового материала Синма-М, формированием в процессе полимеризации плотной, стабильной полимерной сетки, мало подверженной пластифицирующему действию водной среды.

Особого внимания заслуживает поведение материала Синма-М. Показатель микротвердости этого материала после выдержки в воде изменился в наименьшей степени и составил около 20,4 HV, что сопоставимо с показателями фрезерованного ПММА. Такое сохранение твердости, однако, не должно вводить в заблуждение, так как ранее выявленная высокая растворимость (11,21 мкг/мм³) свидетельствует о вымывании низкомолекулярных компонентов из поверхностных слоев, что в долгосрочной перспективе может привести к деградации поверхности.

Материал для трехмерной печати Dental Sand Pro, напротив, показал выраженное и статистически достоверное снижение показателя поверхностной твердости более чем на 12 % по сравнению с исходным. Это свидетельствует о заметном пластифицирующем действии сорбированной водной среды, о неоднородности структуры материала и возможном присутствии структурных дефектов, возникающих в процессе аддитивной технологии 3D-печати. Клиническое применение данного материала для долгосрочного временного протезирования должно быть тщательно взвешено с учетом его склонности к снижению твердости во влажной среде, что может привести к ускоренной деструкции и потере эстетики реставрации.

Микротвердость материала Темпокор снизилась до 16,37 HV, что подтверждает характеристику полиакриловых материалов холодного отверждения, а именно, более низкий показатель степени конверсии мономеров, сниженное значение средней молекулярной массы полученного полимера и, как следствие, неплотной полимерной сетки. Установленное в испытании падение поверхностной твердости реставрации из Темпокор может привести к ускорению износа временных реставраций в полости рта и потере их функциональных свойств.

Таким образом, наиболее стабильные результаты по показателю поверхностной твердости при воздействии водной среды установлены для материала цифровой технологии Huge PMMA. Полимерный композитный материал Dental Sand Pro, применяемый по технологии 3D-печати, оказался наименее стабильным в проведенных сравнительных испытаниях. Для Dental Sand Pro с целью повышения стабильности и водостойкости необходимы дополнительные исследования с целью оптимизации режимов печати и последующей дополнительной обработки для окончательной полимеризации.

Микроструктурный анализ поверхности образцов

При анализе поверхности полированных образцов на микротвердомере Duramin-20 с увеличением ×400 были выявлены различия в микроструктуре исследованных материалов (Рисунок 7).

У композита Dental Sand Pro наблюдалась незначительная пористость, вероятно связанная с особенностями послойного отверждения при 3D-печати. Поверхность фрезерованного Huge PMMA была практически бездефектной, что отражает высокую гомогенность промышленно полимеризованных блоков. У образцов Синма-М отмечались единичные микропоры, характерные для акрилатов горячего отверждения, получаемых методом ручного смешивания. На поверхности Темпокор можно видеть включения крупных частиц наполнителя и выраженную микропористость, обусловленную прежде всего полимеризацией при невысоких температурах, холодным отверждением.

Выявленные структурные неоднородности могут иметь значение при клиническом применении испытанных материалов: повышенная пористость способна влиять на показатель водостойкости полимерных реставрационных материалов, на шероховатость поверхности и, как следствие, на колонизацию микроорганизмов.

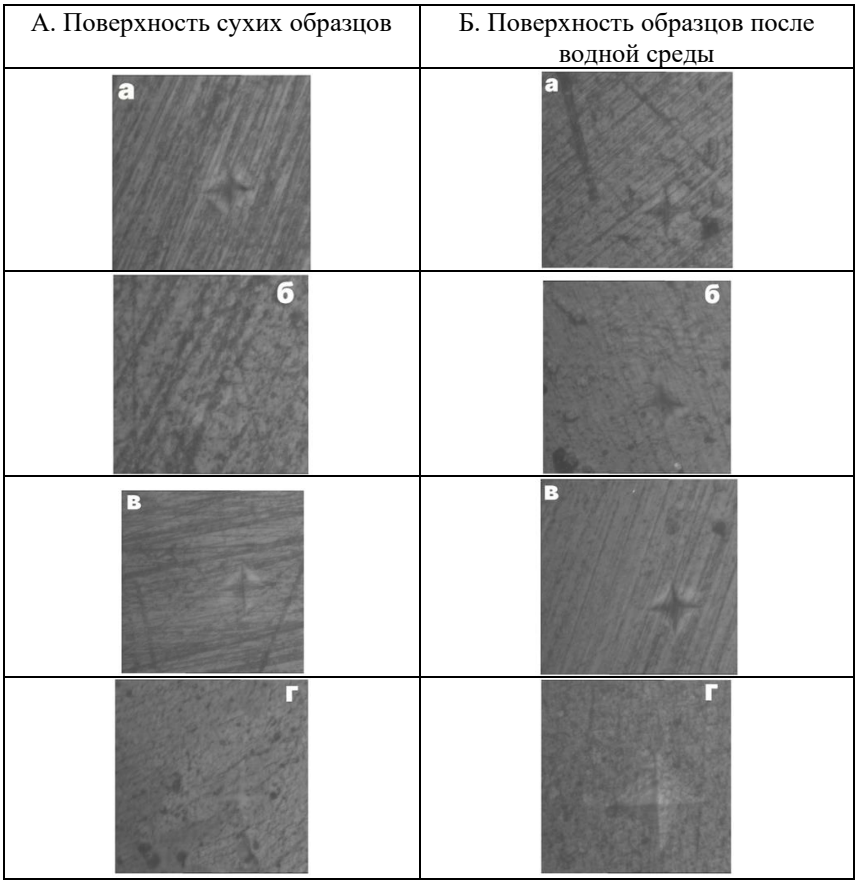


Рисунок 7. Микрофотографии поверхности сухих образцов после полировки (А) и поверхности образцов после экспозиции в воде (Б) (ув. 400×): а – Huge PMMA (CAD/CAM); б – Dental Sand Pro (3D-печать); в – Синма-М (традиционная технология материал горячего отверждения); г – Темпокор (традиционная технология, материал холодного отверждения).

Результаты оценки прочности при сжатии

Результаты исследований материалов для временных ортопедических конструкций показали, что недостаточные механические свойства являются распространенными причинами неудач временных реставраций, таких как деформации и переломы временных коронок. Эти проблемы могут вызывать у пациента дискомфорт и боль, а также ведут к экономическим потерям. Таким образом, механические свойства временных материалов важны и должны учитываться для обеспечения клинического успеха временной реставрации.

Для оценки прочности временных ортопедических конструкций из полимерных материалов, изготовленных цифровыми технологиями в сравнении с традиционными аналоговыми, были проведены испытания для определения разрушающей силы (нагрузки) при статическом сжатии одиночных коронок и трехточечном изгибе мостовидных конструкций. Для испытаний были изготовлены одиночные коронки верхних боковых резцов и первых моляров, а также мостовидные конструкции с промежуточной частью из трех единиц в области премоляра.

Сопоставление полученных значений разрушающей нагрузки с известными функциональными нагрузками жевательного аппарата позволяет оценить механическую надежность реставрационных конструкций из испытуемых материалов. Среднестатистические жевательные усилия в боковом отделе зубного ряда варьируют в пределах 400–600 Н, тогда как во фронтальном отделе они значительно ниже и редко превышают 150 Н.

Как показано в таблице 4, одиночные коронки моляров из фрезерованного ПММА и материала для 3D-печати демонстрируют многократный запас прочности (2250 Н и 1699 Н соответственно), что гарантирует их функциональную надежность даже при парафункциональной активности. Однако принципиальные различия выявляются при анализе результатов испытаний мостовидных конструкций. Если фрезерованный ПММА обеспечивает трех-четырехкратный запас прочности по отношению к вероятным жевательным нагрузкам, то прочность конструкции из материала для 3D-печати (500±100 Н) находится в зоне критических значений, что создает высокий риск разрушения этих реставраций при функциональной перегрузке, например, при бруксизме или случайном попадании плотного пищевого комка.

Таблица 4. Сила при разрушении коронок и мостовидных конструкций, изготовленных по цифровым и аналоговым технологиям, Н (M±SD)

Тип конструкции	HUGE PMMA (CAD/CAM)	Dental Sand Pro (3D-печать)	Синма-М	Темпокор
Одиночные коронки резцов	293 ± 110	161 ± 70	91 ± 11	78 ± 31
Одиночные коронки моляров	2250 ± 498	1699 ± 287	2064 ± 147	929 ± 111
Мостовидные конструкции (3 ед.)	1600 ± 400	500 ± 100	479 ± 158	494 ± 14

При сопоставлении силы разрушения для испытуемых конструкций из сравниваемых материалов наименьшая разница зафиксирована для одиночных коронок моляров: 2250±500 Н для ПММА, а для Dental Sand Pro это значение меньше на 24 % и составляет 1700±290 Н. Для коронок резцов средняя разрушающая нагрузка фрезерованных образцов равнялась 300±110 Н, что почти вдвое превышала показатель разрушающей силы материала для 3D-печати (160±70 Н). Наиболее существенное расхождение выявлено при испытании мостовидных конструкций: конструкции из HUGE PMMA выдерживали нагрузку 1600±400 Н, тогда как образцы из Dental Sand Pro разрушались уже при 500±100 Н, т.е. прочность фрезерованных мостовидных конструкций, выраженная значением разрушающей силы, оказалась более чем в три раза выше.

Испытания материалов, применяемых по традиционной технологии, выявили более низкие значения разрушающей силы для материала холодного отверждения Темпокор. Образцы из акриловой пластмассы горячего отверждения Синма-М показали разрушающую

нагрузку для одиночных коронок моляров на уровне 2064±147 Н, что приблизительно на 20 % выше показателя для Dental Sand Pro, однако для мостовидных конструкций среднее значение разрушающей силы оказалось ниже по сравнению с показателем для HUGE PMMA, и незначительно уступало показателю силы для Dental Sand Pro.

Композитный материал холодного отверждения Темпокор, предназначенный для прямого метода изготовления реставрации, продемонстрировал наиболее низкие значения разрушающей силы. Разрушающая нагрузка для коронок моляров составила 929±111 Н, для мостовидных конструкций — 494±14 Н, а для резцов — 78 ± 31 Н. Полученные данные указывают на то, что по механической надежности Темпокор уступает не только фрезерованному ПММА, но также материалу для 3D-печати и материалу традиционной технологии горячего отверждения Синма-М. Невысокие значения показателя разрушающей нагрузки для этого акрилового материала холодного отверждения ограничивает применение Темпокор преимущественно краткосрочными временными реставрациями.

Характер разрушения образцов

Характер разрушения сравниваемых материалов также имел четкие различия, обусловленные составом и технологией изготовления из них реставраций. На рисунке 8 представлены фотографии коронок моляров до и после испытаний.

Вид коронок моляра на модели начальный		Вид деформации и разрушения коронок моляра	
HUGE PMMA Monolayer (CAD/CAM)	Dental Sand Pro (3D-печать)	HUGE PMMA Monolayer (CAD/CAM)	Dental Sand Pro (3D-печать)
			

Рисунок 8. Вид коронки моляра на модели начальный и разрушенный после приложения нагрузки.

У более прочных фрезерованных коронок наблюдалось множественное растрескивание без полной потери фрагментов; трещины носили локальный характер. Напротив, образцы из Dental Sand Pro раскалывались с образованием нескольких крупных осколков, что свидетельствует о хрупкости материала и наличии внутренних напряжений или дефектов многослойной структуры.

При анализе полученных данных обращает на себя внимание соотношение показателей разрушающей силы коронок для моляров и резцов. Для фрезерованного ПММА оно составило 7,5 (2250 Н / 300 Н), для материала 3D-печати — 10,6 (1700 Н / 160 Н). Более высокое соотноше-

ние у Dental Sand Pro указывает на то, что аддитивная технология критичнее реагирует на уменьшение объема и появление тонких элементов (режущий край резца). Тонкий режущий край резца, сформированный всего несколькими слоями материала при 3D-печати, обладает минимальной структурной целостностью по сравнению с более массивным объемом моляра. Фрезерованный ПММА, благодаря своей гомогенности, демонстрирует более пропорциональное изменение прочности и меньшую зависимость от геометрии реставрации.

Для традиционных материалов характерна еще более выраженная чувствительность к геометрии. Соотношение прочностей «моляр/резец» для Синма-М составило 22,6 (2064 Н / 91,3 Н), что более чем в три раза превышает показатель Dental Sand Pro и указывает на катастрофическое падение прочности при уменьшении объема и появлении тонких элементов. Это обусловлено гетерогенностью структуры, формируемой при ручном смешивании, и наличием микродефектов, критически влияющих на прочность малых конструкций. Для Темпокора соотношение составило 12,0 (929 Н / 77,7 Н), что также существенно выше, чем у фрезерованного ПММА, подтверждая его ограниченную пригодность для фронтальной группы зубов.

Особого внимания заслуживает трехкратное снижение прочности мостовидных конструкций из Dental Sand Pro (сила разрушения 500 Н) по сравнению с одиночными коронками моляров из того же материала (1700 Н). Данный факт подтверждает принципиальное ограничение аддитивного метода: в условиях действия изгибающих напряжений, характерных для мостовидных конструкций, слабым звеном становится недостаточная прочность сцепления между слоями, что обусловливает снижение устойчивости конструкции к разрушению. Для фрезерованных конструкций аналогичное снижение силы разрушения в мостовидных конструкциях выражено в меньшей степени (соответственно 1600 Н относительно 2250 Н для коронок моляров, т.е. снижение показателя примерно на 30 %), что объясняется отсутствием структурной анизотропии.

Выявленное трехкратное снижение значения разрушающей силы для мостовидных конструкций из Dental Sand Pro коррелирует с данными, полученными при исследовании микротвердости .

На основании полученных результатов испытаний прочности реставрационных конструкций по показателю силы разрушения следует подчеркнуть, что полученные значения разрушающих нагрузок для мостовидных конструкций из материала 3D-печати (500±100 Н) находятся в диапазоне функциональных нагрузок, который может возникнуть при жевании вязкой или твердой пищи, особенно у пациентов с пара-функциями, что позволяет квалифицировать применение светоотверждаемых полимерных композитов с керамическим наполнителем для 3D-печати в протяженных конструкциях боковых отделов как клинически рискованное. Для материалов традиционных технологий, как Синма-М, невысокие значения разрушающей силы при испытании мостовидных конструкций (479 ± 158 Н) позволяют предположить их ненадежность для долгосрочного применения в условиях функциональных нагрузок.

Материал Темпокор — полимер холодного отверждения, предназначенный для прямого клинического применения, характеризуется сниженной механической прочностью для жевательной группы зубов, что обусловливает его использование преимущественно для краткосрочных временных реставраций, изготавливаемых прямым методом. Фрезерованный ПММА, демонстрируя как высокие абсолютные показатели, так и благоприятный характер разрушения (локальные сколы вместо фрагментации).

Корреляционный анализ результатов

Сопоставление результатов, полученных разными методами, позволило выявить четкие корреляции между физико-химическими и механическими свойствами. Материалы с высоким водопоглощением закономерно показывали снижение микротвердости, что указывает на ослабление межмолекулярных взаимодействий под действием пластифицирующего эффекта воды. Материалы с высокой растворимостью, сохраняя формально приемлемые показатели твердости, демонстрировали микроструктурные изменения, свидетельствующие о вымывании компонентов. Наиболее сбалансированным комплексом свойств обладает фрезерованный ПММА, сочетающий максимальную прочность, стабильность поверхностных характеристик и устойчивость к воздействию водной среды.

Материалы для 3D-печати, при всей их технологической привлекательности, требуют дальнейшего совершенствования составов и режимов постобработки для преодоления присущих им структурных ограничений. В группе традиционных материалов автоматизированные системы смешивания (Темпокор) обеспечивают качество, сопоставимое с цифровыми технологиями, по физико-химическим показателям, однако их механическая прочность остается недостаточной для долгосрочного применения. Ручное замешивание (Синма-М) является источником неконтролируемой вариабельности и рисков, особенно в отношении чистоты полимерной матрицы и долговечности.

Таким образом, результаты проведенных испытаний убедительно демонстрируют превосходство фрезерованного ПММА HUGE PMMA по совокупности физико-механических и физико-химических характеристик. Конструкции из этого материала, изготовленные по технологии CAD/CAM, обладают надежностью, в том числе функциональной, мостовидных конструкций в боковых отделах зубного ряда. Композит Dental Sand Pro, предназначенный для 3D-печати, может быть рекомендован для одиночных конструкций при умеренных нагрузках, его применение для мостовидных конструкций должно быть ограничено ввиду недостаточной устойчивости при изгибе. Традиционные материалы, Синма-М и особенно Темпокор, могут быть рекомендованы к использованию для одиночных реставраций во фронтальном отделе при тщательном контроле окклюзии. Следует отметить, что коронки из Синма-М для жевательных групп зубов по полученным результатам испытаний имеют достаточно надежные показатели, близкие по значению к показателям материалов цифровых технологий, CAD/CAM и 3D-печати. Результаты прочностных испытаний рестав-

рационных конструкций могут представлять основу для дифференцированного выбора материала в зависимости от конкретной клинической ситуации.

Выводы

1. Фрезерованный ПММА Huge PMMA показал наибольшую несущую способность как для одиночных коронок моляров (2250±498 Н), так и для трехъединичных мостовидных конструкций (1595±397 Н). Материал для 3D-печати Dental Sand Pro, сопоставимый с ПММА по прочности одиночных коронок (1699±287 Н), продемонстрировал трехкратное снижение прочности при переходе к мостовидным конструкциям (500±100 Н) из-за анизотропии свойств и недостаточной межслойной адгезии. Традиционные материалы (Синма-М, Темпокор) уступили по прочности обоим цифровым методам.
2. Наилучшей физико-химической стабильностью обладает фрезерованный ПММА (водопоглощение 26,76±1,70 мкг/мм³, растворимость 0,78±0,16 мкг/мм³ при нормативах 40 и 7,5 мкг/мм³ соответственно). Материал для 3D-печати находится на верхней границе норматива по водопоглощению (40,04±1,59 мкг/мм³). Традиционная пластмасса с ручным замешиванием Синма-М показала критическое превышение допустимой растворимости (11,21±3,17 мкг/мм³), что свидетельствует о вымывании остаточных мономеров.
3. Фрезерованный ПММА сохраняет микротвердость после 7-суточной выдержки в водной среде, тогда как материал для 3D-печати демонстрирует статистически значимое снижение на 12% (с 21,3 до 18,8 HV), коррелирующее с повышенным водопоглощением. Бисакриловый композит Темпокор показал падение микротвердости более чем на 17%. Пластмасса Синма-М, сохранив твердость, выявила высокую растворимость, указывающую на долгосрочную деградацию поверхности.
4. Установлено, что с увеличением планируемого срока использования временной конструкции и повышением функциональной нагрузки критерием выбора становится способность материала сохранять свойства в водной среде. Фрезерованный ПММА является единственным материалом, обеспечивающим стабильность всех изученных параметров при длительной эксплуатации: прочность мостовидных конструкций – 1600±400 Н, растворимость – 0,78±0,16 мкг/мм³ (в 9,6 раза ниже норматива), микротвердость после воды снижается лишь на 6,8%. Материал для 3D-печати (Dental Sand Pro) пригоден только для малых сроков: прочность мостовидных конструкций падает до 500±100 Н (в 3,2 раза ниже ПММА), водопоглощение достигает предела норматива (40,04±1,59 мкг/мм³), микротвердость снижается на 12,4%. Биомеханическая надежность материалы для 3D-печати снижается в условиях изгибающих нагрузок и контакта с водой средой.

Практические рекомендации

1. Для изготовления временных ортопедических конструкций, планируемых к эксплуатации в течение 3-12 месяцев, особенно в боковых отделах зубных рядов и при протяженных мостовидных конструкциях, следует выбирать материалы на основе ПММА, обрабатывае-

мые по технологии CAD/CAM из промышленно полимеризованных блоков. Это обеспечивает оптимальную прочность, стабильность микротвердости и минимальную растворимость.

2. При применении материалов для 3D-печати (керамонаполненные композиты, такие как Dental Sand Pro) необходимо строго соблюдать протоколы пост-полимеризации и учитывать склонность материала к снижению поверхностной твердости во влажной среде.

3. При выборе материалов для традиционных аналоговых методов предпочтение следует отдавать композитным системам двойного отверждения с автоматическим смешиванием компонентов, обеспечивающим более стабильные физико-химические свойства.

4. При планировании ортопедического лечения следует учитывать не только прочностные характеристики материала, но и его поведение в водной среде. Сочетание высокой прочности, низкого водопоглощения и минимальной растворимости является ключевым критерием для прогнозирования долговременной клинической успешности временных реставраций.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Лосев Ф.Ф., Брайловская Т.В., Григорьев М.П., Поюровская И.Я., Маркина Л.А. Влияние состава и технологии применения полимерных материалов для временных реставраций в ортопедической стоматологии на показатели водопоглощения и растворимости. Стоматология. 2026;105(4):5-10.

2. Сравнительная оценка прочности стоматологических полимерных материалов для временных ортопедических реставраций / Ф. Ф. Лосев, Т. В. Брайловская, Ф. С. Русанов, М. П. Григорьев // Стоматология. – 2026. – Т. 105, № 3. – С. 10-14. – DOI 10.17116/stomat202610503110. – EDN ZCHTUI.

3. Лосев Ф.Ф., Брайловская Т.В., Поюровская И.Я., Григорьев М.П., Котик М.С. Материалы для изготовления временных зубных протезов с применением цифровых технологий. Стоматология. 2026;105(3):60-65.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

CAD/CAM – (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) компьютерное проектирование/автоматизированное изготовление

ПММА – полиметилметакрилат

HV – твердость по Виккерсу

ρW – водопоглощение

ρs – растворимость

M – среднее арифметическое значение

SD – стандартное отклонение