

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-1-250-259

УДК 616.314-77:616.314-74:543.42

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ С КЕРАМИЧЕСКИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ АДГЕЗИВНЫХ СИСТЕМ V ПОКОЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Сахабутдинова Д. Р., Демин Я. Д., Тиунова Н. В., Жданова М. Л., Жданов С. Е., Плишкина А. А.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация

Введение. В условиях импортозамещения актуальна оценка российских систем по сравнению с зарубежными аналогами. Адгезивная система Белабонд (ВладМиВа) 5 поколения рассматривается как конкурентоспособная отечественная альтернатива, тогда как OrtiBond Solo Plus (Kerr) служит эталоном с хорошо изученными свойствами и длительным клиническим опытом.

Цель исследования — сравнительная оценка адгезионной связи с керамическими конструкциями адгезивных систем пятого поколения с помощью метода сканирующей электронной микроскопии.

Материалы и методы. В исследовании проведен сравнительный анализ адгезионного соединения российской и зарубежной адгезивных систем пятого поколения с керамическими поверхностями. Образцы керамики обрабатывались адгезивами с предварительным протравливанием и нанесением однокомпонентного адгезива с последующей полимеризацией и послойным формированием наногибридного композитного слоя светового отверждения в контролируемых лабораторных условиях. Микроструктура зон адгезии изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа с анализом глубины и равномерности инфильтрации адгезива, толщины и непрерывности гибридного слоя, состояния коллагеновой матрицы в зоне гибридного слоя, выраженности смоляных нитей, наличия дефектов адгезионного интерфейса.

Результаты. Обе адгезивные системы формируют интердиффузионную зону и гибридный слой в клинически допустимых пределах. В импортном образце отмечалась более равномерная инфильтрация адгезива, однородная толщина гибридного слоя, равномерное распределение смоляных тегов, тогда как в отечественном образце наблюдалась большая вариабельность этих показателей с локальными участками уменьшенной инфильтрации и неоднородной толщины слоя. Коллагеновая матрица сохраняла упорядоченную фибриллярную структуру в обоих образцах, единичные локальные микродефекты интерфейса не нарушали общей целостности соединения. Микроструктурные характеристики отечественной системы остаются сопоставимыми с зарубежным аналогом, подтверждая ее потенциал для клинического применения.

Ключевые слова: адгезивные системы, адгезия, керамические реставрации, адгезионное соединение, сканирующая электронная микроскопия, стоматологические материалы, импортозамещение в стоматологии

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Диана Рамильевна САХАБУТДИНОВА ORCID ID 0009-0008-8834-4225

ассистент кафедры клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
SDDianka@yandex.ru

Ярослав Дмитриевич ДЕМИН ORCID ID 0000-0002-2641-3474

к.м.н., преподаватель кафедры клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
yaroslav-demin@yandex.ru

Наталья Викторовна ТИУНОВА ORCID ID 0000-0001-9881-6574

д.м.н., профессор, заведующий кафедрой клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
natali5_list@list.ru

Мария Леонидовна ЖДАНОВА ORCID ID 0000-0002-3207-0287

к.м.н., доцент кафедры клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
marikas3@mail.ru

Сергей Евгеньевич ЖДАНОВ ORCID ID 0009-0002-7450-5565

к.м.н., преподаватель кафедры клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
Zs-nn@mail.ru

Анна Александровна ПЛИШКИНА ORCID ID 0000-0002-2124-9740

к.м.н., доцент кафедры клинической стоматологии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
annaaleksp@yandex.ru

Адрес для переписки: Наталья Викторовна ТИУНОВА

603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23 (Кафедра клинической стоматологии Института клинической медицины)

+7 (930) 711-11-59

natali5_list@list.ru

Образец цитирования:

Сахабутдинова Д. Р., Демин Я. Д., Тиунова Н. В., Жданова М. Л., Жданов С. Е., Плишкина А. А.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ С КЕРАМИЧЕСКИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ АДГЕЗИВНЫХ СИСТЕМ V ПОКОЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ. Проблемы стоматологии. 2026; 1: 250-259.

© Сахабутдинова Д. Р. и др., 2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-1-250-259

Поступила 30.01.2026. Принята к печати 02.03.2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-1-250-259

COMPARATIVE EVALUATION OF ADHESIVE BONDING TO CERAMIC RESTORATIONS USING FIFTH-GENERATION ADHESIVE SYSTEMS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

Sakhabutdinova D.R., Demin Y.D., Tiunova N.V., Zhdanova M.L., Zhdanov S.E., Plishkina A.A.

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

Introduction. In the context of import substitution, evaluating Russian systems compared to their foreign counterparts is relevant. The fifth-generation Belabond (VladMiVa) adhesive system is considered a competitive domestic alternative, while OptiBond Solo Plus (Kerr) serves as a benchmark with well-studied properties and extensive clinical experience.

The aim of the study was to comparatively evaluate the adhesive bond of fifth-generation adhesive systems to ceramic structures using scanning electron microscopy.

Materials and methods. The study compared the adhesive bonds of Russian and foreign fifth-generation adhesive systems to ceramic surfaces. Ceramic samples were treated with adhesives using pre-etching and application of a single-component adhesive, followed by polymerization, and a light-cured nanohybrid composite layer was formed layer by layer under controlled laboratory conditions. The microstructure of the adhesion zones was studied using a scanning electron microscope, analyzing the depth and uniformity of adhesive infiltration, the thickness and continuity of the hybrid layer, the state of the collagen matrix within the hybrid layer, the presence of resin tags, and the presence of adhesive interface defects.

Results. Both adhesive systems formed an interdiffusion zone and hybrid layer within clinically acceptable limits. The imported sample demonstrated more uniform adhesive infiltration, a uniform hybrid layer thickness, and a uniform distribution of resin tags, whereas the domestic sample showed greater variability in these parameters, with localized areas of reduced infiltration and non-uniform layer thickness. The collagen matrix maintained an ordered fibrillar structure in both samples, and isolated localized microdefects in the interface did not compromise the overall integrity of the bond. The microstructural characteristics of the domestic system remain comparable to those of its foreign counterpart, confirming its potential for clinical application.

Keywords: adhesive systems, adhesion, ceramic restorations, adhesive interface, scanning electron microscopy, dental materials, import substitution in dentistry

The authors declare no conflict of interest

Diana R. SAKHABUTDINOVA ORCID ID 0009-0008-8834-4225

Teaching Assistant, Department of Clinical Dentistry, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
SDDianka@yandex.ru

Yaroslav D. DEMIN ORCID ID 0000-0002-2641-3474

PhD, Teacher of the department, Department of Clinical Dentistry National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
yaroslav-demin@yandex.ru

Natalia V. TIUNOVA ORCID ID 0000-0001-9881-6574

PhD, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Clinical Dentistry National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
natali5_list.ru

Maria L. ZHDANOVA ORCID ID 0000-0002-3207-0287

PhD, Associate Professor, Department of Clinical Dentistry National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
marikac3@mail.ru

Sergey E. ZHDANOV ORCID ID 0009-0002-7450-5565

PhD, Lecturer, Department of Clinical Dentistry National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
Zs-nn@mail.ru

Anna A. PLISHKINA ORCID ID 0000-0002-2124-9740

PhD, Associate Professor, Department of Clinical Dentistry National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
annaaleksp@yandex.ru

Correspondence address: Natalia V. TIUNOVA

23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod, 603022, Russia (Department of Clinical Dentistry, Institute of Clinical Medicine)

+7 (930) 711-11-59

natali5_list.ru

For citation:

Sakhabutdinova D.R., Demin Y.D., Tiunova N.V., Zhdanova M.L., Zhdanov S.E., Plishkina A.A.

COMPARATIVE EVALUATION OF ADHESIVE BONDING TO CERAMIC RESTORATIONS USING FIFTH-GENERATION ADHESIVE SYSTEMS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY. *Actual problems in dentistry*. 2026; 1: 250-259. (In Russ.)

© Sakhabutdinova D.R. et al., 2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-1-250-259

Received 30.01.2026. Accepted 02.03.2026

Введение

В последние десятилетия в стоматологической практике наблюдается устойчивый рост применения керамических реставраций, что обусловлено их высокими эстетическими характеристиками, биосовместимостью и хорошими механическими свойствами [1, 2]. Целно-керамические реставрации стали краеугольным камнем современной реставрационной стоматологии, предлагая исключительную эстетику, биосовместимость и долговечность [3].

Успех клинического применения таких конструкций во многом определяется качеством адгезионного соединения между твердыми тканями зуба и керамическими материалами. Надежность адгезионного соединения напрямую влияет на долговечность и клинический исход реставраций, их устойчивость к функциональным нагрузкам, микроподтеканию, постпломбирочной чувствительности и вторичному кариесу [4–6].

Адгезивные системы пятого поколения широко используются в клинической практике благодаря относительной простоте применения, сокращению количества клинических этапов, стабильным показателям прочности сцепления и длительному клиническому опыту применения (более 20 лет) [7, 8]. Адгезивные системы пятого поколения представляют собой одноступенчатые «single-bottle» системы, основанные на технологии тотального протравливания, что сочетает удобство и сокращение клинических этапов с высокой эффективностью сцепления, обеспечивая оптимальные условия для формирования гибридного слоя и реализации основных механизмов адгезии — сочетания микромеханической и химической связи. Микромеханическая связь возникает за счет инфильтрации низковязких гидрофильных мономеров в деминерализованную коллагеновую матрицу дентина, что формирует прочный гибридный слой и предотвращает микроподтекание реставрационного материала [9]. Химическая адгезия реализуется через функциональные мономеры, такие как 4-МЕТА и НЕМА, которые способствуют более равномерной инфильтрации мономеров и взаимодействуют с минеральными компонентами дентина и эмали, повышая прочность межфазного соединения [4]. Одновременно органофосфатные мономеры (10-MDP), образуют стабильные ионные связи с гидроксипатитом кальция, что значительно увеличивает долговечность адгезионного интерфейса [10]. При этом избыточное содержание НЕМА может приводить к гидролитической деградации адгезионного слоя, поэтому баланс между микромеханической инфильтрацией и химическим взаимодействием остается ключевым фактором обеспечения надежной и долговечной фиксации реставраций [4].

В условиях политики импортозамещения и возрастающего интереса к использованию отечественных стоматологических материалов особую актуальность приобретает объективная оценка их клинического и лабораторного исследования в сравнении с признанными зарубежными аналогами [11–13]. Адгезивная система Белабонд (ВладМиВа), относящаяся к 5 поко-

лению, позиционируется как конкурентоспособная отечественная адгезивная система, однако в литературе представлено ограниченное количество данных о ее микроструктурных характеристиках и химическом взаимодействии с керамическими материалами, что затрудняет полноценную оценку ее клинических свойств. В качестве сравнительного эталона часто используется адгезивная система OptiBond (Kerr), которая может служить эталоном для исследования благодаря длительному и широкому клиническому опыту применения и хорошо изученным характеристикам, отраженным в многочисленных клинических и лабораторных исследованиях.

Новые отечественные адгезивные системы являются перспективными и доступными материалами, однако для подтверждения их свойств требуется детальный анализ микроструктуры с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). С помощью СЭМ можно оценить форму, размер и равномерность распределения неорганических наполнителей (частиц) и органической матрицы, их распределение и связь между фазами, а также выявить неоднородности в структуре материала. Электронные микрофотографии дают наглядное представление о внутренней структурной целостности адгезива, позволяя определить, насколько однородна и стабильна система. На основании этих изображений можно делать выводы о потенциальной эффективности системы: однородная и плотная структура, без микропустот и агрегаций частиц, свидетельствует о высокой прочности и стабильности, тогда как наличие дефектов или неравномерного распределения фаз может указывать на слабые места, снижающие адгезию и долговечность материала.

Таким образом, существует явный дефицит информации о свойствах отечественных адгезивных систем в сравнении с зарубежными аналогами. Настоящее исследование направлено на устранение этого пробела посредством детального сравнительного анализа российских и зарубежных систем с использованием современных методов микроструктурного анализа.

Цель исследования — сравнительная оценка адгезионной связи с керамическими конструкциями адгезионных систем пятого поколения с помощью метода сканирующей электронной микроскопии.

Материалы и методы

В исследование были включены 30 удаленных третьих моляров верхней и нижней челюстей, удаленных по ортодонтическим показаниям (рис. 1). Отобранные для исследования зубы не имели кариозных поражений, трещин, реставраций, признаков деминерализации, патологической стираемости или иных структурных дефектов коронки и корня. Все образцы характеризовались анатомической целостностью и минимальными вариациями размеров и формы, что обеспечивало сопоставимость полученных результатов.

Критерии включения образцов в научное исследование:

- третьи моляры верхней и нижней челюсти, удаленные по ортодонтическим показаниям

- образцы интактные: анатомически целые, без кариозных дефектов, очагов деминерализации, выраженной стираемости, трещин, сколов и других механических повреждений коронки и корня
- отсутствие реставраций: пломб, коронок или иных реставрационных конструкций
- минимальные различия в морфометрических параметрах: сохраненная анатомическая форма и близкие пространственные размеры.

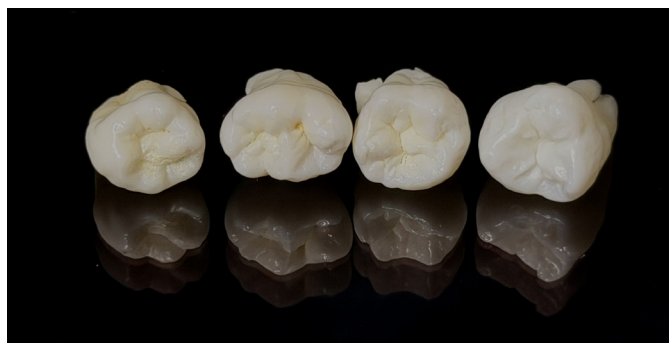


Рис. 1. Образцы удаленных третьих моляров верхней и нижней челюстей, использующихся в исследовании
Fig. 1. Samples of extracted upper and lower third molars used in the research

Критерии исключения образцов из научного исследования:

- образцы, не соответствующие критериям целевой выборки исследования (отличные от третьих моляров верхней и нижней челюсти)
- образцы, имеющие морфологические дефекты твердых тканей зуба (трещины, сколы, кариозные дефекты, выраженную стираемость, фрагментацию коронковой или корневой части), признаки ятрогенных повреждений, возникших в процессе удаления
- образцы, подвергшиеся каким-либо лечебным вмешательствам и имеющие реставрации (лечение кариеса, эндодонтическое лечение)
- образцы, подвергшиеся воздействию химических агентов или иной обработке, потенциально способной изменить их микроструктуру
- образцы, хранившиеся в ненадлежащих условиях после удаления (высушенные или механические повреждения при хранении).

Отобранные образцы были разделены методом случайной выборки на две статистически эквивалентные группы по 15 образцов в каждой:

Группа 1 — керамические образцы из дисиликата лития E-max (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн) зафиксированы к образцам удаленных зубов верхней и нижней челюстей с использованием зарубежной однокомпонентной адгезивной системы V поколения OptiBond Solo Plus (Kerr, США) и наногибридного светоотверждаемого композитного материала.

Группа 2 — керамические образцы из дисиликата лития E-max (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн) зафиксированы к образцам удаленных зубов верхней и нижней

челюстей с применением однокомпонентной отечественной адгезивной системы V поколения «Белабонд» (Владивосток, Россия) и наногибридного светоотверждаемого композитного материала.

Идентичность условий хранения, фиксации и используемых материалов обеспечила сопоставимость двух исследуемых групп и позволила провести объективный сравнительный анализ адгезионных характеристик двух систем.

После удаления и до начала научного исследования все образцы удаленных зубов прошли необходимые этапы предварительной подготовки, включающие тщательное удаление органических остатков и загрязнений, с последующим промыванием в дистиллированной воде. До начала экспериментального этапа образцы хранились в антисептической среде — 2% растворе хлоргексидина в течение 3 недель с периодической заменой раствора каждые 10–14 дней с целью обеспечения стабильных условий и предотвращения микробной контаминации.

Для обеспечения механической устойчивости образца, минимизации риска повреждения зубных тканей и повышения точности позиционирования в процессе сепарации каждый образец зуба фиксировали в акриловой смоле с сохранением доступа к плоскости среза. После полимеризации смолы выполняли сепарацию окклюзионной поверхности зуба с формированием срезов толщиной 2 мм с использованием триммера, оснащенного карборундовым диском Klettflix (Renfert, Германия) при постоянном водяном охлаждении для предотвращения перегрева, образования трещин и структурных деформаций. Полученные срезы подвергали многоэтапной механической обработке, включающей последовательное шлифование абразивами с зернистостью 320–1200 grit и последующую полировку пастой на основе оксида алюминия для достижения требуемой степени гладкости, необходимой для микроскопического анализа. Завершающим этапом являлся визуальный контроль качества поверхности под стоматологическим микроскопом для исключения наличия царапин, микродефектов и неоднородностей (рис. 2).

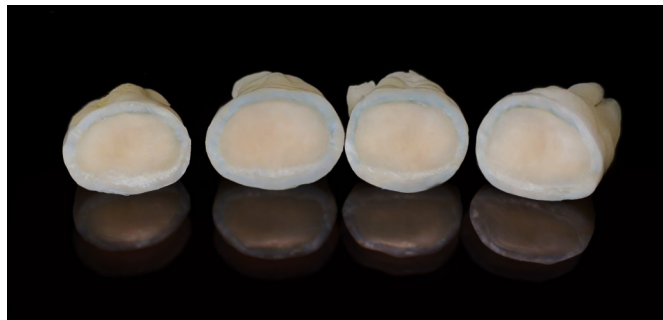


Рис. 2. Сепарированная окклюзионная поверхность образцов зубов
Fig. 2. Separated occlusal surface of the tooth samples

Перед нанесением адгезивных систем срезы зубов подвергались химической фиксации с целью сохранения морфологии дентина и подготовки поверхности к после-

дующему микроскопическому анализу гибридного слоя. Данная процедура была направлена на стабилизацию органических и минеральных компонентов дентина, предотвращение аутолитических процессов и минимизацию структурных деформаций, возникающих на этапах механической обработки. Фиксация срезов зуба имела решающее значение для стабилизации коллагеновой матрицы деминерализованного дентина после протравливания, предотвращая ее коллапс, ограничивая активацию эндогенных белков, таких как матриксные металлопротеиназы (ММР-2, ММР-9, ММР-20), способствующих ферментативной деградации интерфейса [14], и обеспечивая достоверную визуализацию гибридного слоя. Подготовленные образцы помещали в 2–3 % раствор глутаральдегида на 24 часа при температуре 4 °С в соответствии с типовыми протоколами подготовки для СЭМ. После фиксации образцы промывали в фосфатном буферном растворе (PBS) для удаления остаточного фиксатора и предотвращения его влияния на качество изображения.

Для данного исследования использовались образцы с основанием 5 на 5 мм, изготовленные из блоков дисиликата лития E-max (Ivoclar Vivadent, Лихтенштейн) оттенка А2 (рис. 3). Литий-дисиликатная керамика — двухфазный стеклокерамический материал, состоящий из стекловидной матрицы и кристаллических фаз дисиликата лития ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), равномерно распределенных в материале, обеспечивающих высокую прочность и благоприятные оптические свойства [15]. Стекловидная матрица в основном включает диоксид кремния (SiO_2) и оксид лития (Li_2O), однако для улучшения химических и механических характеристик в ее состав вводятся добавки оксида алюминия (Al_2O_3), оксида калия (K_2O), оксида фосфора (P_2O_5) и оксида циркония (ZrO_2) [15, 17]. После окончательной кристаллизации материал приобретает однородную микроструктуру, повышающую его устойчивость к механическим нагрузкам и трещинообразованию [16]. Такое сочетание состава и микроструктуры обеспечивает прочность на изгиб более 360 МПа, высокую биосовместимость и превосходные эстетические характеристики [15, 16]. В совокупности эти свойства, а также высокое содержание кремнезема, обеспечивающее высокую адгезию к твердым тканям зуба, делают E-max одним из наиболее востребованных материалов в эстетической стоматологии [15, 16].

Проектирование цифровой модели керамического образца выполняли в программном обеспечении Exocad, после чего файл был экспортирован и изготовлен методом компьютерного фрезерования по технологии CAD/CAM на установке CEREC MC XL (Dentsply Sirona, Германия). Полученные образцы после фрезерования не подвергались дополнительной лабораторной обработке: окрашиванию, глазурованию, обжигу в керамической печи и полированию. Удаление хвостовиков и финишную обработку осуществляли с использованием повышающего наконечника (Dentsply Sirona, Германия) и мелкозернистых алмазных инструментов категории «fine» (Meisinger, Германия) с водяным и воздушным охлаждением.

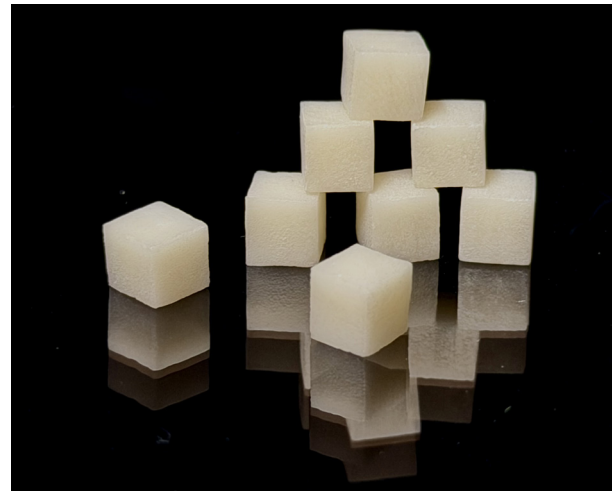


Рис. 3. Керамические образцы из материала E-max с основанием 5×5 мм

Fig. 3. Ceramic samples made of E-max material with a base of 5x5 mm

Для обеспечения объективности сравнения и воспроизводимости полученных данных все образцы удаленных зубов были распределены на две экспериментальные группы методом случайной выборки. К дентину каждого зуба адгезивно фиксировали литий-дисиликатный керамический фрагмент из материала E-max с помощью стандартного светополимеризационного устройства Ivoclar i500. В первой группе использовалась однокомпонентная адгезивная система V поколения иностранного производителя OptiBond Solo Plus (Kerr, США), во второй — однокомпонентная адгезивная система V поколения отечественного производства Белабонд (Владивосток).

Перед фиксацией керамических образцов поверхность литий-дисиликатной керамики подвергали стандартной обработке: протравлению 5 % плавиковой кислотой в течение 20 секунд для формирования микрорельефа поверхности, обеспечивающего микромеханическую ретенцию, промыванию струей воды в течение 60 сек. и высушиванию струей сжатого воздуха; нанесению силан-содержащего агента на 60 сек. для активации поверхности керамики и повышения эффективности химической связи с композитным материалом, удалению излишков материала слабой струей воздуха с целью формирования равномерно пленки.

Техника применения адгезивных систем пятого поколения (total-etch) в настоящем исследовании включала стандартный трехэтапный протокол: протравливание эмали и дентина 35 % ортофосфорной кислотой (15–20 сек. для эмали и 10–15 сек. для дентина), промывание струей воды в течение 20–30 сек. и контролируемое высушивание, что обеспечивало удаление смазанного слоя, формирование микрорельефа эмали и экспонирование коллагеновой матрицы деминерализованного дентина; затем на подготовленную поверхность наносили однокомпонентный адгезив, объединяющий функции праймера и адгезива, с последующим распределением легкой струей воздуха для удаления избыточного материала и формирования равномерного

тонкого слоя, и световой полимеризацией в течение 20 сек., что обеспечивало инфильтрацию деминерализованного дентина и формирование гибридного слоя. Фиксацию образца керамики к поверхности подготовленного дентина осуществляли с помощью наногибридного композитного материала светового отверждения. Адгезионный интерфейс формировался за счет микро-механической ретенции, обусловленной проникновением смоляных мономеров в микропоры протравленной керамики и инфильтрованного дентина, а также химического взаимодействия функциональных групп адгезива с компонентами композита, что обеспечивало высокую прочность и стабильность соединения.

После адгезивной фиксации керамических фрагментов с применением исследуемых адгезивных систем выполняли сепарацию медиальной или дистальной поверхности зуба вместе с прикрепленным керамическим образцом. Для обеспечения точности позиционирования и воспроизводимости процедуры каждый образец предварительно фиксировали в акриловой смоле, обеспечивающей свободный доступ к области планируемого среза. Формирование ровной и однородной поверхности, пригодной для анализа зоны адгезивного контакта между керамикой, композитным материалом, адгезивным слоем и твердыми тканями зуба, осуществляли с использованием зуботехнического триммера, чтобы получить характерные срезы для последующего изучения особенностей микромеханического сцепления и химического взаимодействия в области межфазной границы.

Полученные срезы применяли для макро- и микроскопической оценки качества формирования адгезионного соединения, а также для анализа непрерывности и однородности адгезивного интерфейса, что имеет принципиальное значение для прогноза прочности и клинической долговечности реставраций. С целью удаления остаточных абразивных частиц образцы подвергали ультразвуковой очистке в дистиллированной воде, после чего высушивали струей сжатого воздуха. Для стабилизации физико-химического состояния поверхностных слоев и минимизации влияния постобработки на структуру адгезивного интерфейса образцы дополнительно выдерживали в дистиллированной воде в течение 24 часов перед проведением микроскопического исследования.

Для изучения морфологии и элементного состава исследуемых образцов применяли СЭМ на JSM-IT300LV (JEOL), что обеспечивало высокое пространственное разрешение и точность визуализации адгезивного интерфейса «дентин-адгезив». В отличие от световой микроскопии, где изображение формируется видимым светом, СЭМ использует сфокусированный пучок электронов с длиной волны, на несколько порядков меньшей длины волны света, что обеспечивает значительно более высокое разрешение и увеличение до 10^7 раз, тогда как предел световой микроскопии ограничен примерно $\times 2000$ [18].

Исследование проводили в режиме низкого вакуума, обеспечивающего разрешение 4 нм при сохранении ускоряющего напряжения 0,5–30 кВ, который позволяет получать качественные изображения непроводящих

и чувствительных образцов зубов без необходимости нанесения проводящих покрытий и снижения структурных артефактов, возникающих при традиционной высоковакуумной визуализации. Анализ низковакуумных СЭМ-изображений особенно ценен для оценки топографии поверхности, зоны взаимной диффузии, нитевидных структур дентина и краевых зазоров эмали, поскольку обеспечивает детальную визуализацию без разрушительного воздействия на органические и неорганические компоненты ткани [19].

Такой подход к изучению поверхности позволяет выявлять тонкие особенности гибридного слоя и микро-механические взаимодействия между дентином, адгезивом и цементным материалом, что критично для оценки качества адгезии и прогнозирования долговечности реставраций. Полученные в результате исследования СЭМ-изображения высокого разрешения дают возможность анализировать инфильтрацию адгезива в дентинную матрицу, оценивать взаимодействие с коллагеновыми фибриллами, а также количественно и качественно характеризовать гибридный слой по толщине, однородности и наличию микропор или трещин, что обеспечивает комплексную оценку адгезионного интерфейса.

Для обработки полученных данных использовались методы вариационной статистики, включая расчет средних значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации. Статистическая обработка результатов исследования выполнялась с использованием программной среды R.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе сканирующей электронной микроскопии была выполнена серия микрофотографий, исследуемых образцов каждой экспериментальной группы при увеличениях $\times 40$, $\times 100$, $\times 1000$, $\times 2000$ (табл. 1).

В первой экспериментальной группе на микрофотографиях, полученных методом СЭМ, представлена микроструктура импортной адгезивной системы 5 поколения, нанесенной на поверхность композитного материала и керамики. Анализ морфологических особенностей интерфейса позволил выделить ряд ключевых характеристик, отражающих особенности функционирования адгезивной системы на этапе формирования адгезионного соединения:

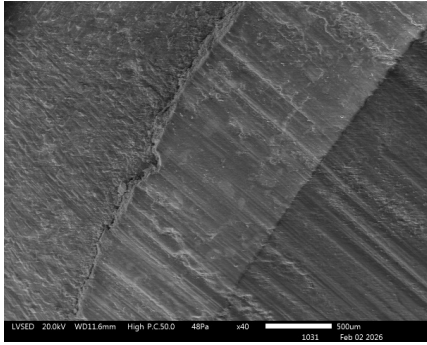
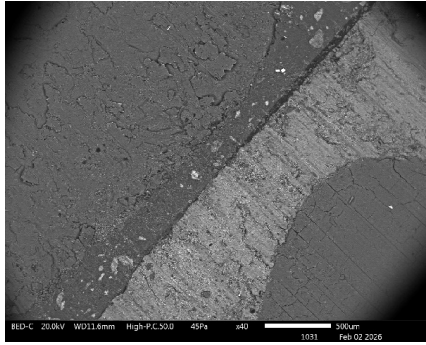
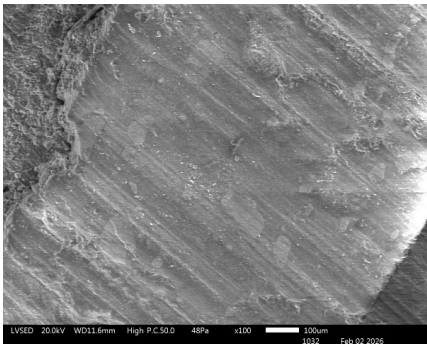
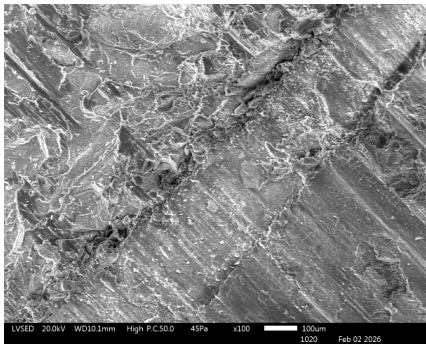
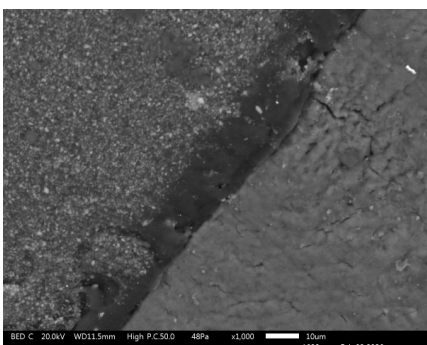
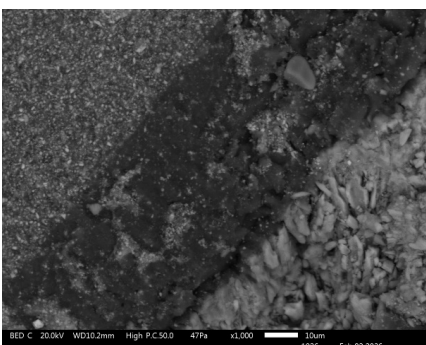

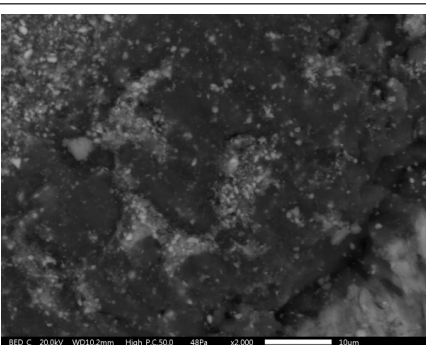
Глубина и равномерность инфильтрации адгезива: на представленных микрофотографиях зона проникновения адгезивных мономеров в деминерализованный дентин формирует отчетливо различимую интердиффузионную зону с фактической глубиной инфильтрации в среднем 3–5 мкм, с локальными участками уменьшения до 2 мкм. С точки зрения морфологии адгезивного интерфейса, оптимальной глубиной инфильтрации адгезива в дентин считается величина, сопоставимая с глубиной деминерализации, формируемой кислотой при протравливании, то есть в пределах 3–5 мкм. Именно при такой глубине обеспечивается полноценное заполнение межфибриллярных пространств коллагеновой матрицы, формирование стабильного гибридного слоя, минимизация зоны неинфильтрованного деминерализованного дентина,

являющейся наиболее уязвимой областью для гидролитической и ферментативной деградации. В образце 1 большая часть интерфейса соответствует данному диапазону, что является морфологически достаточной глубиной инфильтрации. Наличие участков с глубиной

около 2 мкм потенциально свидетельствует о формировании зон частично инфильтрованного дентина, что снижает прогнозируемую долговечность соединения. По данному критерию импортный образец 1 демонстрирует удовлетворительную равномерность инфильтрации.

Таблица 1

Результаты исследования поверхности образцов адгезивных систем
Table 1. Results of the study of the surface of adhesive system samples

Увеличение	Группа образцов	
	Образец 1	Образец 2
40		
100		
1000		
2000		

Толщина и непрерывность гибридного слоя: гибридный слой в образце 1 четко идентифицируется по всей длине исследуемого участка со средней толщиной 2,5–5 мкм, с локальными увеличениями до 6 мкм, что является оптимальным для систем total-etch, демонстрируя достаточную глубину деминерализации, полноценную инфильтрацию и формирование полноценной интердиффузионной зоны. Гибридный слой образца 1 непрерывный и морфологически сформированный, с участками структурной неоднородности, что может быть связано с чувствительностью адгезива к влаге и особенностям смачивания деминерализованного дентина.

Состояние коллагеновой матрицы в зоне гибридного слоя: коллагеновый каркас в области формирования гибридного слоя сохраняет упорядоченную фибриллярную структуру, что указывает на отсутствие выраженного коллапса деминерализованного дентина и создает условия для проникновения адгезивных мономеров. Вместе с тем выявляются участки незначительного снижения насыщенности полимерной фазой, указывающие на частичную инфильтрацию коллагеновых фибрилл.

Выраженность и морфология смоляных тегов (нитей): в образце 1 выявлены смоляные теги длиной приблизительно 5–15 мкм, с выраженной вариабельностью их распределения по поверхности границы. Наличие и стабильная морфология смоляных нитей отражают способность адгезива эффективно проникать в дентинные каналы и формировать дополнительную микромеханическую фиксацию.

Наличие дефектов адгезионного интерфейса: по совокупности микрофотографий в пределах интерфейса выявлены локальные микродефекты в виде микрополостей и микроразрывов размером 0,3–1,0 мкм, преимущественно в зоне контакта адгезива с гибридным слоем. Протяженных участков расслоения интерфейса не обнаружено, что свидетельствует об удовлетворительной адгезии по всей длине интерфейса.

Во второй группе проводилась оценка адгезивной системы 5 поколения российского производства со следующими результатами:

Глубина и равномерность инфильтрации адгезива: по данным изображений, полученных при СЭМ в образце 2 формируется интердиффузионная зона между деминерализованным дентином и полимеризованным адгезивом с фактической глубиной инфильтрации мономеров в дентин в пределах примерно 2–4 мкм. В образце 2 в большинстве наблюдаемых участков глубина инфильтрации приближается к данному диапазону, что указывает на достаточное пропитывание коллагеновой матрицы. Небольшие локальные участки с уменьшением глубины инфильтрации не носят протяженного характера и не формируют сплошных зон частично инфильтрированного дентина. В совокупности полученных данных можно сделать вывод, что по данному критерию образец 2 демонстрирует удовлетворительную равномерность и достаточную глубину инфильтрации адгезива.

Толщина и непрерывность гибридного слоя: гибридный слой в образце 2 выявляется по всей длине

контакта, имеет выражено неоднородную структуру. Его толщина колеблется в пределах 2–4 мкм, с локальными зонами утолщения до 5 мкм, что соответствует морфологическим параметрам, характерным для клинически состоятельных адгезивных систем. Гибридный слой преимущественно непрерывный, без протяженных разрывов и выраженных зон истончения — отмечаемая локальная структурная неоднородность носит ограниченный характер. Образец 2 демонстрирует удовлетворительное качество формирования гибридного слоя и интердиффузионной зоны.

Состояние коллагеновой матрицы в зоне гибридного слоя: коллагеновая матрица в зоне гибридного слоя в образце 2 в целом сохраняет упорядоченную фибриллярную организацию без признаков коллапса коллагенового каркаса. Выявляемые отдельные зоны с несколько пониженной плотностью полимерной фазы имеют ограниченную протяженность, не свидетельствуют о неполной инфильтрации мономеров в толщу коллагенового матрикса и не формируют непрерывных участков недостаточной пропитки. Состояние коллагеновой матрицы и характер ее пропитывания в образце 2 расцениваются как удовлетворительные и обеспечивающие морфологическую стабильность гибридного слоя.

Выраженность и морфология смоляных тегов (нитей): в образце 2 во многих дентинных каналцах выявляются смоляные нити, имеющие преимущественно вытянутую, упорядоченную форму, вариабельность длины и плотности, длину 4–10 мкм, с отдельными более длинными структурами. Распределение смоляных тегов по поверхности интерфейса является равномерным и отражает адекватную проникающую способность адгезивной системы в устья дентинных каналцев после кислотного протравливания.

Наличие дефектов адгезионного интерфейса: в зоне гибридного слоя выявляются локальные морфологические дефекты в виде микропор, полостей и микроразрывов размером около 0,5 мкм, не образующие протяженных цепочек и не сопровождающиеся расслоением интерфейса. Признаков выраженного отрыва адгезивного слоя от дентина не выявлено. Наличие единичных микродефектов может рассматриваться как допустимое для экспериментальных условий и не оказывает существенного влияния на общую целостность адгезионного интерфейса.

На основании полученных в результате исследования данных можно сделать следующие выводы:

Глубина и равномерность инфильтрации адгезива: оба образца демонстрируют формирование интердиффузионной зоны в клинически приемлемом диапазоне глубины. При этом для образца 1 характерна более стабильная и равномерная инфильтрация адгезива по всей протяженности интерфейса, тогда как в образце 2 отмечается большая вариабельность глубины проникновения с отдельными локальными участками ее уменьшения.

Толщина и непрерывность гибридного слоя: в обоих образцах гибридный слой выявляется по всей длине контакта дентин-адгезив. В образце 1 он характеризу-

ется более однородной толщиной и морфологически более равномерной структурой, тогда как в образце 2 чаще наблюдаются локальные изменения толщины и отдельные участки структурной неоднородности.

Состояние коллагеновой матрицы в зоне гибридного слоя: в обоих образцах коллагеновая матрица в зоне формирования гибридного слоя сохраняет упорядоченную фибриллярную организацию без признаков выраженного коллапса. Характер пропитывания коллагенового каркаса полимерной фазой в образцах 1 и 2 сопоставим, а выявляемые локальные зоны несколько сниженной насыщенности имеют ограниченную протяженность и не формируют непрерывных участков недостаточной инфильтрации.

Выраженность и морфология смоляных тегов (нитей): смоляные теги формируются в обоих образцах и имеют типичную для систем total-etch морфологию. В образце 1 они в среднем более протяженные и распределены более равномерно, тогда как в образце 2 отмечается большая вариабельность их длины и плотности по поверхности интерфейса.

Наличие дефектов адгезионного интерфейса: в обоих образцах выявляются единичные микродефекты в виде микропор и микроразрывов, однако их размеры и распространенность сопоставимы. Дефекты носят локальный

характер, не формируют протяженных зон расслоения и не сопровождаются нарушением общей целостности адгезионного интерфейса.

Заключение

Результаты проведенного лабораторного исследования подтвердили эффективность адгезивных систем пятого поколения при формировании адгезионной связи с керамическими конструкциями, что подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии. Импортная адгезивная система пятого поколения продемонстрировала стабильное формирование гибридного слоя, равномерную инфильтрацию мономеров в дентин и выраженную микромеханическую фиксацию. Российская адгезивная система показала в целом сопоставимые морфологические характеристики адгезионного интерфейса, включая глубину инфильтрации, состояние коллагеновой матрицы и целостность границы раздела. При этом выявленные особенности микроструктуры гибридного слоя и интердиффузионной зоны свидетельствуют о потенциале дальнейшего развития и совершенствования материала. Полученные данные указывают на перспективность адгезивной системы российского производства и возможность достижения ею уровня ведущих зарубежных аналогов при последующей оптимизации.

Литература/References

1. Warreth A., Elkareimi Y. All-ceramic restorations: a review of the literature. The Saudi Dental Journal. 2020;32(8):365–372. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2020.05.004>
2. Lu Y., van Steenoven A., Dal Piva A. M. O., Tribst J. P. M., Wang L., Kleverlaan C. J. et al. Additive-manufactured ceramics for dental restorations: a systematic review on mechanical perspective. Frontiers in Dental Medicine. 2025;6:1512887. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2025.1512887>
3. Khatib S., Alqahtani A., Attaf S., Alzaid S., Alshehri F., Alshammari N. et al. Indications, Clinical Success and Failure Rate of All-Ceramic Restorations. Journal of Healthcare Sciences. 2024;4(12):912–917. <https://doi.org/10.52533/JOHS.2024.41234>
4. Bourgi R., Kharouf N., Cuevas-Suárez C. E., Lukomska-Szymanska M., Haikel Y., Hardan L. A Literature Review of Adhesive Systems in Dentistry: Key Components and Their Clinical Applications. Applied Sciences. 2024;14(18):8111. <https://doi.org/10.3390/app14188111>
5. Pilecco R. O., da Rosa L. S., Pereira G. K. R., Tribst J. P. M., May L. G., Valandro L. F. The loss of resin cement adhesion to ceramic influences the fatigue behavior of bonded lithium disilicate restorations. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2023;148:106169. <https://doi.org/10.1016/j.jmbmm.2023.106169>
6. Nizami M. Z. I., Jindarojanakul A., Ma Q., Lee S. J., Sun J. Advances in Bioactive Dental Adhesives for Caries Prevention: A State-of-the-Art Review. Journal of Functional Biomaterials. 2025;16(11):418. <https://doi.org/10.3390/jfb16110418>
7. Kazak M., Dönmez N. Development of Dentin Bonding Systems from Past to Present. Bezmialem Science. 2019;7(4):322–330. <https://doi.org/10.14235/bas.galenos.2019.3102>
8. Разумова С. Н., Браго А. С., Руда О. Р., Гурьева З. А., Аджиева Э. В. Применение универсальных адгезивных систем в стоматологии: нарративный обзор. Российский стоматологический журнал. 2024;28(5):512–521. [Razumova S. N., Brago A. S., Ruda O. R., Gurieva Z. A., Adzhieva E. V. Universal adhesive systems in dentistry: A narrative review. Russian Journal of Dentistry. 2024;28(5):512–521. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/dent439601>
9. Breschi L., Maravic T., Mazzitelli C., Josic U., Mancuso E., Cadenaro M. et al. The evolution of adhesive dentistry: From etch-and-rinse to universal bonding systems. Dental Materials. 2025;41(2):141–158. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.11.011>
10. Abdelkhalik E., Hamama H. H., Mahmoud S. H. HEMA-free versus HEMA-containing adhesive systems: a systematic review. Systematic Reviews. 2025;14(1):17. <https://doi.org/10.1186/s13643-025-02763-w>
11. Шамитова Е. Н., Юманов О. Д., Габайдуллина В. В., Юманов А. О. Импортзамещение иностранных композитных материалов по их биохимическому составу. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022;(9):7–11. [Shamitova E. N., Yumanov O. D., Gabaydullina V. V., Yumanov A. O. Import substitution of foreign composite materials according to their biochemical composition. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2022;(9):7–11. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17513/mjprfi.13432>
12. Мерзликina Л. Е. Вероятные пути импортозамещения стоматологических материалов. Молодежный инновационный вестник. 2023;12(S2):512–515. [Merzlikina L. E. Probable ways of import substitution of dental materials. Youth Innovation Bulletin. 2023;12(S2):512–515. (In Russ.)]. <https://medj.rucml.ru/journal/45562d594f555448494e4c4f42554c4c2d41525449434c452d38313637/>
13. Пашенко А. Д., Пашенко Т. Ю. Анализ российского рынка медицинских изделий с точки зрения обеспечения национальной безопасности. Сборники конференций НИЦ Социосфера. 2020;(25):338–342. [Pashchenko A. D., Pashchenko T. Y. Analysis of the Russian market of medical products from the perspective of ensuring national security. Sborniki konferentsii NITs Sotsiosfera. 2020;(25):338–342. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43150241>
14. Alsaeed A. Y. Bonding CAD/CAM materials with current adhesive systems: An overview. The Saudi Dental Journal. 2022;34(4):259–269. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2022.03.005>
15. Fayed A. K., Azer A. S., AboElhassan R. G. Fit accuracy and fracture resistance evaluation of advanced lithium disilicate crowns (in-vitro study). BMC Oral Health. 2025;25(1):58. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05325-z>
16. Guaita-Sáez R., Montiel-Company J. M., Agustín-Panadero R., Fons-Badal C., Serra-Pastor B., Solá-Ruiz M. F. Analysis of Different Lithium Disilicate Ceramics According to Their Composition and Processing Technique — A Systematic Review and Meta-Analysis. Materials. 2025;18(12):2709. <https://doi.org/10.3390/ma18122709>
17. Munoz A., Louca C., Vichi A. Characterization of a Lithium Disilicate CAD/CAM Material with Firing Temperature-Controlled Translucency. Materials. 2025;18(7):1591. <https://doi.org/10.3390/ma18071591>
18. Nawrocka A., Piwonski I., Sauro S., Porcelli A., Hardan L., Lukomska-Szymanska M. Traditional Microscopic Techniques Employed in Dental Adhesion Research — Applications and Protocols of Specimen Preparation. Biosensors. 2021;11(11):408. <https://doi.org/10.3390/bios11110408>
19. Scholz K. J., Bittner A., Cieplik F., Hiller K. A., Schmalz G., Buchalla W. et al. Micromorphology of the Adhesive Interface of Self-Adhesive Resin Cements to Enamel and Dentin. Materials. 2021;14(3):492. <https://doi.org/10.3390/ma14030492>