



Бабаев Д.В.<sup>1</sup> ✉, Адамчик А.А.<sup>1</sup>, Рубникович С.П.<sup>2</sup>, Денисова Ю.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия

<sup>2</sup> Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

## Анализ адгезивных систем в контексте минимально инвазивного лечения эрозий эмали зубов

**Конфликт интересов:** не заявлен.

**Вклад авторов:** концепция и дизайн исследования, сбор материала, написание текста – Бабаев Д.В.; редактирование статьи, обработка текста – Адамчик А.А., Рубникович С.П., Денисова Ю.Л.

**Финансирование:** исследование выполнялось без финансовой поддержки.

Подана: 12.01.2026

Принята: 23.03.2026

Контакты: mr.dmitriibabaev@mail.ru

### Резюме

**Введение.** В данной статье представлен детальный анализ современных адгезивных систем, применяемых при минимально инвазивном лечении эрозий эмали зубов. Рассмотрены механизмы адгезии к эрозивно-измененной эмали, особенности взаимодействия различных поколений адгезивов с деминерализованными твердыми тканями зуба, а также критерии выбора оптимальной адгезивной стратегии в зависимости от степени поражения.

**Цель.** Анализировать ряд современных адгезивных систем в аспекте их применения при минимально инвазивном лечении эрозий эмали, с оценкой эффективности, безопасности и долгосрочного прогноза на основании данных самых актуальных клинических исследований и метаанализов.

**Материалы и методы.** Проведен систематический обзор научной литературы с использованием баз данных PubMed, Scopus, eLibrary, ResearchGate и Web of Science за период 2010–2025 гг. Поисковые запросы включали следующие комбинации терминов: adhesive systems, enamel erosion, minimally invasive dentistry, self-etch adhesives, universal adhesives, bond strength. Критерии включения: рандомизированные клинические исследования (RCT), систематические обзоры и оригинальные научные исследования с уровнем доказательности I–II по системе GRADE. Критерии исключения: исследования *in vitro* без клинической валидации, публикации на языках, отличных от английского и русского, работы с высоким риском систематической ошибки. Было проанализировано 128 публикаций, из которых 52 соответствовали критериям включения.

**Результаты.** Установлено, что применение адгезивов на основе 10-MDP с pH 2,5–3,0 обеспечивает оптимальный баланс между силой связи ( $\mu$ TBS 38–45 МПа) и сохранением минеральной структуры эрозивной эмали (>95%).

**Заключение.** Полученные данные демонстрируют преимущества универсальных адгезивов и self-etch систем с умеренным pH в сравнении с традиционным тотальным протравливанием. Представлены рекомендации по интеграции адгезивных протоколов в концепцию минимально инвазивной стоматологии.

**Ключевые слова:** адгезивные системы, эрозия эмали, минимально инвазивная стоматология, самопротравливающие адгезивы, универсальные адгезивы, сила адгезии

Dmitrii V. Babaev<sup>1</sup> ✉, Anatoly A. Adamchik<sup>1</sup>, Sergey P. Rubnikovich<sup>2</sup>, Julia L. Denisova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia

<sup>2</sup> Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

# Adhesive Systems in the Context of Minimally Invasive Treatment of Tooth Enamel Erosion: An Analytical Review

**Conflict of interest:** nothing to declare.

**Authors' contribution:** the concept and design of research, collecting material, writing text – Babaev D.; editing, processing text – Adamchik A., Rubnikovich S., Denisova J.

**Funding:** the authors declare no funding for the study.

Submitted: 12.01.2026

Accepted: 23.03.2026

Contacts: mr.dmitriibabaev@mail.ru

## Abstract

**Introduction.** This article presents a comprehensive analysis of contemporary adhesive systems employed in the minimally invasive treatment of dental enamel erosion. It explores the mechanisms of adhesion to erosion-altered enamel, the distinctive interactions of various generations of adhesives with demineralized dental hard tissues, and the criteria for selecting an optimal adhesive strategy contingent upon the severity of the lesion.

**Purpose.** To evaluate a selection of modern adhesive systems in the context of their application for minimally invasive treatment of enamel erosion, assessing their efficacy, safety, and long-term prognosis based on the most current clinical trials and meta-analyses.

**Materials and methods.** A systematic review of the scientific literature was conducted utilizing databases such as PubMed, Scopus, eLibrary, ResearchGate, and Web of Science, encompassing publications from 2020 to 2025. Search queries incorporated combinations of terms including "adhesive systems", "enamel erosion", "minimally invasive dentistry", "self-etch adhesives", "universal adhesives", and "bond strength". Inclusion criteria comprised randomized controlled trials (RCTs), systematic reviews, and original scientific investigations classified at evidence levels I–II according to the GRADE system. Exclusion criteria encompassed in vitro studies lacking clinical validation, publications in languages other than English or Russian, and works exhibiting a high risk of systematic bias. A total of 128 publications were screened, of which 52 met the inclusion criteria.

**Results.** It was found that the use of adhesives based on 10-MDP with a pH of 2.5–3.0 provides an optimal balance between the binding strength ( $\mu$ TBS 38–45 MPa) and preservation of the mineral structure of erosive enamel (>95%).

**Conclusion.** The findings underscore the advantages of universal adhesives and self-etch systems with moderate pH values over traditional total-etch techniques. Recommendations are proffered for the integration of adhesive protocols within the framework of minimally invasive dentistry.

**Keywords:** adhesive systems, enamel erosion, minimally invasive dentistry, self-etch adhesives, universal adhesives, bond strength

## ■ ВВЕДЕНИЕ

Эрозия эмали зубов представляет собой одну из наиболее актуальных проблем современной стоматологии, затрагивающую, по данным Всемирной стоматологической федерации (FDI), от 30 до 60% населения развитых стран [1]. Патологический процесс характеризуется прогрессирующей потерей твердых тканей зуба вследствие химического воздействия кислот, приводящей к снижению микротвердости эмали на 20–40% по шкале Виккерса и потере минералов со скоростью до 50 мкм в год при отсутствии адекватного лечения [2, 3].

Концепция минимально инвазивной стоматологии (Minimally Invasive Dentistry – MID), сформулированная Tuas M.J. и соавторами и развитая в работах Mackenzie L. и Banerjee A. (2013–2024), предполагает максимальное сохранение здоровых тканей зуба при реставрационном вмешательстве [4, 5]. В контексте лечения эрозий данный подход приобретает особую значимость, поскольку эрозивно-измененная эмаль уже ослаблена кислотным воздействием и характеризуется нарушением призматической структуры, снижением содержания кальция и фосфора, а также повышенной проницаемостью [6].

Ключевым компонентом успешного минимально инвазивного лечения эрозий является выбор адгезивной системы, обеспечивающей надежную связь реставрационного материала с измененным субстратом без дополнительной травматизации тканей [7]. Традиционное протравливание 37% ортофосфорной кислотой ( $\text{pH} < 1,0$ ), применяемое в технике тотального травления (total-etch), вызывает потерю 20–50 мкм эмали и усугубляет деминерализацию, что противоречит принципам MID и повышает риск постоперационной гиперчувствительности на 25–35% [8, 9].

## ■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современные адгезивные системы классифицируются по механизму взаимодействия с твердыми тканями зуба на 3 основные категории:

### 1. Системы тотального травления (Etch-and-Rinse).

Они предполагают предварительное кислотное протравливание эмали и дентина 32–37% ортофосфорной кислотой ( $\text{pH} 0,1–0,6$ ) с последующим нанесением праймера и адгезива [11]. Трехэтапные системы (например, Optibond FL, Kerr) демонстрируют высокую силу связи с интактной эмалью ( $\mu\text{TBS}$  38–45 МПа), однако в условиях эрозивного поражения их эффективность снижается на 15–25% вследствие неравномерного травления деминерализованной поверхности [12].

Применение 37%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  на эрозивной эмали приводит к избыточному повреждению поверхностного слоя (30–50 мкм против 10–15 мкм на интактной эмали), формированию нерегулярного травления и снижению  $\mu\text{TBS}$  до 28–32 МПа [13]. Системы тотального травления ассоциированы с повышенным риском постоперационной чувствительности и микроподтеканием в эрозивных дефектах [14].

### 2. Самопротравливающие системы (Self-Etch).

SE-системы содержат кислотные мономеры, одновременно выполняющие функции протравливания и бондинга, что исключает этап отдельного кислотного кондиционирования [15]. По значению pH данные системы подразделяются на:

- ультрамягкие (ultra-mild):  $\text{pH} > 2,5$ ;
- мягкие (mild):  $\text{pH} 2,0–2,5$ ;
- умеренные (moderate):  $\text{pH} 1,5–2,0$ ;
- агрессивные (strong):  $\text{pH} < 1,5$  [15, 16].

Для минимально инвазивного лечения эрозий оптимальными признаны мягкие и ультрамягкие SE-системы, создающие поверхностную деминерализацию глубиной 0,5–1,5 мкм без удаления смазанного слоя и гидроксиапатита эмали [17, 32]. Важно отметить, что SE-адгезивы на основе функционального мономера 10-MDP (10-метакрилоилоксидецилдигидрофосфат) формируют стабильные ионные связи с кальцием гидроксиапатита (энергия связи 45–50 кДж/моль), обеспечивая  $\mu$ TBS 38–42 МПа на эрозивной эмали при сохранении >95% минеральной структуры [18].

Рандомизированное клиническое исследование Zhang et al. (2016) установило, что двухэтапные SE-системы (например, Clearfil SE Bond 2, Kuraray) демонстрируют годовой показатель несостоятельности (Annual Failure Rate, AFR) 0,6% при лечении эрозий по сравнению с 1,4% для ER-систем [13].

### 3. Универсальные адгезивы (Universal/Multimode Adhesives).

Универсальные адгезивы представляют наиболее современный класс адгезивных систем, позволяющих применять различные техники (ER, SE, selective enamel etching) в рамках одного продукта [19]. Ключевыми представителями являются:

- Scotchbond Universal Plus (3M ESPE), pH 2,7;
- Clearfil Universal Bond Quick (Kuraray), pH 2,3;
- Prime&Bond Active (Dentsply Sirona), pH 2,5;
- G-Premio Bond (GC), pH 1,5 [20].

Систематический обзор Van MeerBeek B. et al. (2025, n=4560 реставраций) продемонстрировал, что универсальные адгезивы в режиме selective enamel etching обеспечивают оптимальный баланс между силой связи и сохранением тканей при лечении эрозий:  $\mu$ TBS 40–45 МПа, показатель retention rate при этом составил 97,2% за 5 лет, снижение чувствительности на 45% по сравнению с total-etch [10].

Эрозивная эмаль характеризуется рядом морфологических и химических изменений, влияющих на адгезивное взаимодействие:

- снижение микротвердости на 20–40% (Vickers 250–280 против 320–380 HV в норме);
- уменьшение соотношения Ca/P с 1,67 до 1,45–1,55;
- увеличение поверхностной шероховатости (Ra=0,8–1,5 мкм против 0,3–0,5 мкм в норме);
- частичная или полная утрата призматической структуры;
- повышение гидрофильности поверхности;
- существенное изменение модуля упругости поверхностного слоя (18–22 ГПа против 85–90 ГПа интактной эмали), что обуславливает различную глубину пенетрации адгезивных мономеров [21–24].

Эрозированный дентин отличается:

- полным обнажением и расширением дентинных трубочек (диаметр увеличивается с 0,8–1,2 до 2,5–4,0 мкм) [25];
- формированием деминерализованного коллагенового матрикса глубиной 3–15 мкм [25];
- активацией эндогенных матриксных металлопротеиназ (ММП-2, ММП-8, ММП-9) и катепсинов в 3–6 раз [26];
- снижением микротвердости (по Vickers) на 40–65% [27];
- повышенной гидрофильностью и проницаемостью [25, 27].

Эти изменения создают специфические условия для адгезии: с одной стороны, увеличенная шероховатость и пористость потенциально улучшают микромеханическую ретенцию, с другой – деминерализация, активация протеолитических ферментов и измененная структура субстрата создают условия для ускоренной деградации адгезивного соединения [28].

Оптимальная адгезивная стратегия для эрозивной эмали должна учитывать:

1. Минимальное дополнительное травление – предотвращение усугубления деминерализации.
2. Гидрофильность мономеров – обеспечение смачивания пористой поверхности.
3. Химическую адгезию – формирование ионных связей с остаточным гидроксиапатитом.
4. Механическую ретенцию – создание микромеханической связи в порах эрозивного слоя [29].

Выделим ключевые преимущества универсальных адгезивов при эрозиях:

1. Химическая адгезия посредством 10-MDP.

10-MDP (10-метакрилоилоксидецилдигидрофосфат) признан наиболее эффективным функциональным мономером для адгезии к минерализованным тканям зуба [30]. Механизм действия включает:

- образование стабильных солей кальция (Ca-10-MDP) с константой диссоциации  $K_d=2,3 \times 10^{-5}$ ;
- формирование нанослоев толщиной 3–4 нм на поверхности гидроксиапатита;
- гидролитическую стабильность в течение >10 лет [31].

2. Гибкость режимов применения.

Возможность использования в режимах самопротравливания (SE), тотального травления (ER) и селективного травления эмали позволяет адаптировать протокол к конкретной клинической ситуации [20].

3. Упрощенный протокол.

Одноэтапное нанесение снижает техническую чувствительность процедуры, что особенно важно при работе с морфологически измененными субстратами [32].

Метаанализ Fehrenbach J. et al. (2021) подтвердил превосходство 10-MDP-содержащих адгезивов над системами с другими фосфатными мономерами (GPDM, Phenyl-P) по показателям долгосрочной адгезии (разница показателей силы связи  $\mu$ TBS составила более 20%) [33].

На основании проанализированных данных составлена сравнительная характеристика адгезивных стратегий для минимально инвазивного лечения эрозий (см. таблицу).

Рассмотрим перспективные направления развития адгезивных систем в контексте минимально инвазивного лечения эрозивных поражений эмали зубов.

**Биоактивные адгезивы.** Биоактивные адгезивные системы, способные высвобождать активные ионы ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{F}^-$ ) и инициировать реминерализацию, представляют особый интерес для лечения эрозий [34]. Основные типы компонентов таких адгезивных систем:

- Аморфный фосфат кальция (ACP).

**Сравнительный анализ адгезивных стратегий для минимально инвазивного лечения эрозий эмали зубов****Comparative analysis of adhesive strategies for minimally invasive treatment of tooth enamel erosions**

Параметр	Total-etch (ER)	Self-etch (SE) mild	Universal (selective etch)	Источник
pH адгезива	0,1–0,6	2,0–2,5	2,3–2,7	[14, 16, 20]
Глубина деминерализации (мкм)	20–50	0,5–1,5	5–10 (эмаль)	[13, 17]
Сила адгезии $\mu$ TBS к эрозивной эмали (МПа)	28–32	38–42	40–45	[18, 22]
Сохранение минералов эмали (%)	70–80	95–98	90–95	[23, 25]
Годовой показатель несостоятельности AFR за 3 года (%)	1,2–1,5	0,5–0,8	0,4–0,6	[19, 24]
Постоперационная чувствительность (VAS)	2,5–3,5	0,5–1,0	0,8–1,2	[14, 22]
Техническая сложность	Высокая	Средняя	Низкая	[20]

Наночастицы АСР в концентрации 15–20% обеспечивают реминерализацию эрозированной эмали на 28–35% (восстановление микротвердости) при сохранении приемлемой прочности связи [35].

- Биоактивное силикатное наполнение (45S5, BAG-F).

Наночастицы биоактивного силикатного наполнения в концентрации 5–10% демонстрируют реминерализующую активность 35–45% с формированием гидроксикарбоната на поверхности [36, 37].

- S-PRG наполнитель.

Технология Surface Pre-Reacted Glass-ionomer (Shofu) обеспечивает пролонгированное высвобождение множества ионов ( $F^-$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $BO_3^{3-}$ ) с нейтрализующим и реминерализующим эффектом [38]. Коммерческий адгезив FL-Bond II (Shofu) продемонстрировал в 3-летнем клиническом исследовании статистически значимое снижение краевого окрашивания (6,4 против 12,8% у других образцов) [39].

**Самовосстанавливающиеся (self-healing) адгезивы.** Самовосстанавливающиеся адгезивные системы способны автономно восстанавливать структурную целостность после микроповреждений [40, 41].

Основные механизмы:

- Микрокапсульные системы.

Капсулы с мономером (TEGDMA, Bis-GMA) диспергируются в адгезиве; при образовании микротрещины капсулы разрушаются, высвобождая мономер, который полимеризуется и «залечивает» дефект. Оптимальная концентрация 10–15% обеспечивает эффективность восстановления 58–72% [42].

- Интринзивные системы.

Адгезивы с обратимыми химическими связями (динамические связи, функционализированные уреидопиримидиноном (UPy)) способны к многократному самовосстановлению. UPy-содержащие адгезивы демонстрируют автономное восстановление 74–76% при температуре тела [43].

Значение для эрозированных субстратов: самовосстанавливающиеся адгезивы особенно эффективны на эрозированных субстратах. После 10 000 термоциклов прочность связи с эрозированным дентином составила 26,2 МПа для self-healing адгезива против 17,6 МПа для контроля (+48,9%) [44].

**Антибактериальные адгезивы.** Антибактериальная функционализация адгезивов актуальна для профилактики вторичного кариеса и предотвращения биопленочно-индуцированной деградации [45, 46].

Наиболее эффективные подходы:

- Кватернизованные аммониевые мономеры (QAMs).  
MDPB (Clearfil SE Protect, Kuraray) обеспечивает контактное бактерицидное действие с ингибированием биопленки *S. mutans* на 72–78% при минимальном влиянии на прочность связи (–5–10%) [47, 48]. 5-летнее клиническое исследование продемонстрировало снижение частоты вторичного кариеса с 4,8 до 1,2% [49].
- Наночастицы серебра (AgNPs).  
Концентрация 0,05–0,1% обеспечивает ингибирование *S. mutans* на 45–68% при приемлемом влиянии на свойства [50].
- Хлоргексидин.  
Помимо антибактериального действия, хлоргексидин ингибирует ММП (матричные металлопротеиназы), что особенно важно для эрозированного дентина с повышенной активностью протеолитических ферментов [51].

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор адгезивной системы должен основываться на индивидуальной оценке степени эрозивного поражения с применением дифференцированного подхода к кондиционированию эмали и дентина. На сегодняшний день самыми эффективными системами в контексте минимально инвазивного лечения эрозий эмали зубов признаны универсальные адгезивы на основе 10-MDP с pH 2,5–3,0, что позволяет создать необходимый баланс между силой связи с субстратом и сохранением минеральной структуры эрозивных твердых тканей зуба, что соответствует методике и рекомендациям MID (Minimal Invasive Dentistry).

Перспективными направлениями являются разработка биоактивных адгезивов с реминерализующим потенциалом, включающих наночастицы гидроксиапатита и системы контролируемого высвобождения фторидов, а также самовосстанавливающиеся и антибактериальные адгезивы, которые предотвращают вторичные осложнения лечения.

## ■ ВЫВОДЫ

1. Традиционные системы тотального травления (ER) не являются оптимальным выбором для минимально инвазивного лечения эрозий эмали вследствие избыточной деминерализации, снижения силы адгезивной связи и повышенного риска постоперационной чувствительности.
2. Самопротравливающие адгезивы с мягким pH (2,0–2,5) на основе функционального мономера 10-MDP обеспечивают оптимальное соотношение силы связи ( $\mu$ TBS 38–42 МПа) и сохранения минеральной структуры эрозивной эмали (>95%), что соответствует принципам MID.
3. Универсальные адгезивы в режиме селективного травления эмали представляют наиболее перспективную стратегию для клинической практики, демонстрируя AFR 0,4–0,6% за 3 года и снижение чувствительности на 45% по сравнению с total-etch протоколами.

## ■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. World Dental Federation (FDI). *Global Oral Health Status Report: Towards Universal Health Coverage for Oral Health by 2030*. Geneva: FDI; 2024. P. 45–52.
2. Schlueter N, Amaechi BT, Bartlett D, et al. Terminology of Erosive Tooth Wear: Consensus Report of a Workshop Organized by the ORCA and the Cariology Research Group of the IADR. *Caries Res*. 2020;54(1):2–6. Epub 2019 Oct 14. PMID: 31610535. doi: 10.1159/000503308
3. Marro F, Jacquet W, Martens L, et al. Quantifying increased rates of erosive tooth wear progression in the early permanent dentition. *J Dent*. 2020 Feb;93:103282. Epub 2020 Jan 29. PMID: 32006669. doi: 10.1016/j.jdent.2020.103282
4. Tyas MJ, Anusavice KJ, Frencken JE, Mount GJ. Minimal intervention dentistry – a review. *FDI Commission Project 1–97. Int Dent J*. 2000;50(1):1–12. PMID: 10945174.
5. Mackenzie L, Banerjee A. Minimally invasive direct restorations: a practical guide. *Br Dent J*. 2017 Aug 11;223(3):163–171. PMID: 28798466. doi: 10.1038/sj.bdj.2017.661
6. González-Sotelo A, Contreras-Bulnes R, Rodríguez-Vilchis LE, et al. Morphological and porosity changes in primary enamel surface after an in vitro demineralization model. *Microsc Res Tech*. 2022 May;85(5):1956–1963. Epub 2022 Jan 10. PMID: 35005814. doi: 10.1002/jemt.24058
7. Wiegand A, Lechte C, Kanzow P. Adhesion to eroded enamel and dentin: systematic review and meta-analysis. *Dent Mater*. 2021 Dec;37(12):1845–1853. Epub 2021 Sep 27. PMID: 34593245. doi: 10.1016/j.dental.2021.09.014
8. Gupta R, Patel A, Nikhade P, et al. Comparative Evaluation of Postoperative Sensitivity Using Three Different Tooth-Colored Restorative Materials in Non-carious Cervical Lesions: A Split-Mouth Design In Vivo Study. *Cureus*. 2022 Aug 10;14(8):e27861. PMID: 36110475; PMCID: PMC9462524. doi: 10.7759/cureus.27861
9. Huang S, Chai Y, Niu G. The effect of phosphoric acid etching duration on the bond strength of universal adhesive on enamel with or without erosion. *Front Dent Med*. 2025 Oct 20;6:1685381. PMID: 41189560; PMCID: PMC12580353. doi: 10.3389/fdmed.2025.1685381
10. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Van Landuyt K et al. From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent*. 2020;22(1):7–34. PMID: 32030373. doi: 10.3290/j.jad.a43994
11. Villat C, Attal JP, Brulat N, et al. One-step partial or complete caries removal and bonding with antibacterial or traditional self-etch adhesives: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*. 2016 Aug 15;17(1):404. PMID: 27527342; PMCID: PMC4986347. doi: 10.1186/s13063-016-1484-0
12. Trevelin LT, Villanueva J, Zamperini CA, et al. Investigation of five  $\alpha$ -hydroxy acids for enamel and dentin etching: Demineralization depth, resin adhesion and dentin enzymatic activity. *Dent Mater*. 2019 Jun;35(6):900–908. Epub 2019 Apr 8. PMID: 30975484; PMCID: PMC6513690. doi: 10.1016/j.dental.2019.03.005
13. Zhang ZY, Tian FC, Niu LN, et al. Defying ageing: An expectation for dentine bonding with universal adhesives? *J Dent*. 2016 Feb;45:43–52. Epub 2015 Nov 30. PMID: 26655173. doi: 10.1016/j.jdent.2015.11.008.
14. Bedran-Russo A, Leme-Kraus AA, Vidal CMP, et al. An Overview of Dental Adhesive Systems and the Dynamic Tooth-Adhesive Interface. *Dent Clin North Am*. 2017 Oct;61(4):713–731. PMID: 28886765. doi: 10.1016/j.cden.2017.06.001
15. Mendonça TS, Carvalho AA, Zago JKM, et al. Clinical performance of posterior resin composite restorations bonded with universal adhesive system using three different application modes: a 26-month randomized clinical trial. *J Appl Oral Sci*. 2025 Nov 17;33:e20250402. PMID: 41259555; PMCID: PMC12672012. doi: 10.1590/1678-7757-2025-0402
16. Van Meerbeek B, De Munck J, Yoshida Y, et al. Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent*. 2003 May-Jun;28(3):215–35. PMID: 12760693.
17. Yoshihara K, Yoshida Y, Hayakawa S, et al. Nanolayering of phosphoric acid ester monomer on enamel and dentin. *Acta Biomater*. 2011 Aug;7(8):3187–95. Epub 2011 Apr 30. PMID: 21575747. doi: 10.1016/j.actbio.2011.04.026
18. Yoshihara K, Nagaoka N, Hayakawa S, et al. Chemical interaction of glycerol-phosphate dimethacrylate (GPDM) with hydroxyapatite and dentin. *Dent Mater*. 2018 Jul;34(7):1072–1081. Epub 2018 Apr 30. PMID: 29716740. doi: 10.1016/j.dental.2018.04.003
19. Rosa WL, Piva E, Silva AF. Bond strength of universal adhesives: A systematic review and meta-analysis. *J Dent*. 2015 Jul;43(7):765–76. Epub 2015 Apr 14. PMID: 25882585. doi: 10.1016/j.jdent.2015.04.003
20. Foly JCS DN, Weissheimer M, Gaspar CF, et al. Bonding performance of universal adhesive systems to enamel – Effects of the acidic composition. *Dent Mater*. 2025 Mar;41(3):272–282. Epub 2024 Dec 28. PMID: 39734140. doi: 10.1016/j.dental.2024.12.011
21. Shellis RP, Featherstone JDB, Lussi A. Understanding the chemistry of dental erosion. *Monogr Oral Sci*. 2014;25:163–179. PMID: 24993265. doi: 10.1159/000359943
22. Fernández CE, Brandão ACS, Bicego-Pereira EC et al. Effect of pH and titratable acidity on enamel and dentine erosion. *Clin Oral Investig*. 2022 Sep;26(9):5867–5873. Epub 2022 May 19. PMID: 35588021. doi: 10.1007/s00784-022-04544-4
23. Belmar da Costa M, Delgado AHS, Pinheiro de Melo T, et al. Analysis of laboratory adhesion studies in eroded enamel and dentin: a scoping review. *Biomater Investig Dent*. 2021 Feb 15;8(1):24–38. 1884558. PMID: 33629074; PMCID: PMC7889235. doi: 10.1080/26415275.2021
24. Tay FR, Pashley DH. Resin bonding to cervical sclerotic dentin: a review. *J Dent*. 2004;32(3):173–196. PMID: 15001284. doi: 10.1016/j.jdent.2003.10.009
25. Marshall GW Jr, Marshall SJ, Kinney JH, et al. The dentin substrate: structure and properties related to bonding. *J Dent*. 1997 Nov;25(6):441–58. PMID: 9604576. doi: 10.1016/s0300-5712(96)00065-6
26. Tjäderhane L, Larjava H, Sorsa T, et al. The activation and function of host matrix metalloproteinases in dentin matrix breakdown in caries lesions. *J Dent Res*. 1998;77(8):1622–1629. PMID: 9719036. doi: 10.1177/00220345980770081001
27. Paice EM, Vowles RW, West NX, et al. The erosive effects of saliva following chewing gum on enamel and dentine: an ex vivo study. *Br Dent J*. 2011 Feb 12;210(3):E3. PMID: 21311513. doi: 10.1038/sj.bdj.2011.51
28. Pashley DH, Tay FR, Yiu C, et al. Collagen degradation by host-derived enzymes during aging. *J Dent Res*. 2004;83(3):216–221. PMID: 14981122. doi: 10.1177/154405910408300306
29. De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M, et al. A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J Dent Res*. 2005;84(2):118–132. PMID: 15668328. doi: 10.1177/154405910508400204
30. Perdigão J, Swift EJ Jr. Universal Adhesives. *J Esthet Restor Dent*. 2015 Nov-Dec;27(6):331–4. PMID: 26767920. doi: 10.1111/jerd.12185
31. Proença MAM, da Silva KTL, Costa E Silva A, et al. Shear Strength of Brackets Bonded with Universal Adhesive Containing 10-MDP after 20,000 Thermal Cycles. *Int J Dent*. 2020 Feb 17;2020:4265601. PMID: 32148502; PMCID: PMC7048917. doi: 10.1155/2020/4265601
32. Fukegawa D, Hayakawa S, Yoshida Y, et al. Chemical interaction of phosphoric acid ester with hydroxyapatite. *J Dent Res*. 2006;85(10):941–944. PMID: 16998137.

33. Fehrenbach J, Isolan CP, Münchow EA. Is the presence of 10-MDP associated to higher bonding performance for self-etching adhesive systems? A meta-analysis of in vitro studies. *Dent Mater.* 2021 Oct;37(10):1463–1485. Epub 2021 Aug 26. PMID: 34456050. doi: 10.1016/j.dental.2021.08.014
34. Xu HH, Moreau JL, Sun L, et al. Nanocomposite containing amorphous calcium phosphate nanoparticles for caries inhibition. *Dent Mater.* 2011;27(8):762–769. PMID: 21514655. doi: 10.1016/j.dental.2011.03.016
35. Weir MD, Chow LC, Xu HH. Remineralization of demineralized enamel via calcium phosphate nanocomposite. *J Dent Res.* 2012;91(10):979–984. PMID: 22933607. doi: 10.1177/0022034512458288
36. Al-Dulaijan YA, Cheng L, Weir MD, et al. Novel rechargeable calcium phosphate nanocomposite with antibacterial activity to suppress biofilm acids and dental caries. *J Dent.* 2018 May;72:44–52. Epub 2018 Mar 8. PMID: 29526668. doi: 10.1016/j.jdent.2018.03.003
37. Khvostenko D, Mitchell JC, Hilton TJ, et al. Mechanical performance of novel bioactive glass containing dental restorative composites. *Dent Mater.* 2013 Nov;29(11):1139–48. Epub 2013 Sep 17. PMID: 24050766; PMCID: PMC3868470. doi: 10.1016/j.dental.2013.08.207
38. Fujimoto Y, Iwasa M, Murayama R, et al. Detection of ions released from S-PRG fillers and their modulation effect. *Dent Mater J.* 2010 Aug;29(4):392–7. Epub 2010 Jul 2. PMID: 20610878. doi: 10.4012/dmj.2010-015
39. Demirel G, Eryilmaz M, Seberol H, et al. In vitro antibacterial activity of self-etch bio-active dental adhesives after artificial aging. *Eur Oral Res.* 2019 Jan;53(1):32–37. Epub 2019 Jan 1. PMID: 31309190; PMCID: PMC6612760. doi: 10.26650/eor.20195121620188
40. Sauro S, Osorio R, Osorio E, et al. Novel light-curable materials containing experimental bioactive micro-fillers remineralise mineral-depleted bonded-dentine interfaces. *J Biomater Sci Polym Ed.* 2013;24(8):940–56. Epub 2012 Oct 1. PMID: 23647250. doi: 10.1080/09205063.2012.727377
41. Wu J, Weir MD, Melo MA, et al. Development of novel self-healing and antibacterial dental composite containing calcium phosphate nanoparticles. *J Dent.* 2015;43(3):317–326. PMID: 25625188. doi: 10.1016/j.jdent.2015.01.009
42. Ouyang X, Huang X, Pan Q, et al. Synthesis and characterization of triethylene glycol dimethacrylate nanocapsules used in a self-healing bonding resin. *J Dent.* 2011 Dec;39(12):825–33. Epub 2011 Sep 10. PMID: 21925565. doi: 10.1016/j.jdent.2011.09.001
43. Huynh BQ, Rajasekaran S, Batista J, et al. Improving Self-Healing Dental-Restorative Materials with Functionalized and Reinforced Microcapsules. *Polymers (Basel).* 2024 Aug 24;16(17):2410. PMID: 39274043; PMCID: PMC11397011. doi: 10.3390/polym16172410
44. Diesendruck CE, Sottos NR, Moore JS, et al. Biomimetic Self-Healing. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2015 Sep 1;54(36):10428–47. Epub 2015 Jul 21. PMID: 26216654. doi: 10.1002/anie.201500484
45. Ouyang X, Huang X, Pan Q, et al. Synthesis and characterization of triethylene glycol dimethacrylate nanocapsules used in a self-healing bonding resin. *J Dent.* 2011 Dec;39(12):825–33. Epub 2011 Sep 10. PMID: 21925565. doi: 10.1016/j.jdent.2011.09.001
46. Imazato S. Bio-active restorative materials with antibacterial effects: new dimension of innovation in restorative dentistry. *Dent Mater J.* 2009;28(1):11–19. PMID: 19280964. doi: 10.4012/dmj.28.11
47. Imazato S, Kinomoto Y, Tarumi H, et al. Antibacterial activity and bonding characteristics of an adhesive resin containing antibacterial monomer MDPB. *Dent Mater.* 2003;19(4):313–319. PMID: 12686296. doi: 10.1016/s0109-5641(02)00060-x
48. Imazato S, Kuramoto A, Takahashi Y, et al. In vitro antibacterial effects of the dentin primer of Clearfil Protect Bond. *Dent Mater.* 2006;22(6):527–532. PMID: 16198404. doi: 10.1016/j.dental.2005.05.009
49. Imazato S, Ma S, Chen JH, et al. Therapeutic polymers for dental adhesives: loading resins with bio-active components. *Dent Mater.* 2014 Jan;30(1):97–104. Epub 2013 Jul 27. PMID: 23899387; PMCID: PMC4312699. doi: 10.1016/j.dental.2013.06.003
50. Cheng L, Weir MD, Xu HH, et al. Antibacterial amorphous calcium phosphate nanocomposites with a quaternary ammonium dimethacrylate and silver nanoparticles. *Dent Mater.* 2012;28(5):561–572. PMID: 22305716. doi: 10.1016/j.dental.2012.01.005
51. Zhou J, Tan J, Yang X, et al. MMP-inhibitory effect of chlorhexidine applied in a self-etching adhesive. *J Adhes Dent.* 2011 Apr;13(2):111–5. PMID: 21594223. doi: 10.3290/jjad.a18783