УДК 546.47:616.31
DOI https://doi.org/10.35220/2523-420X/2026.3.18

М.Ю. Клюшта,
кандидат медичних наук,
асистент кафедри ортопедичної стоматології;
ДНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького»,
вул. Пекарська, 69, м. Львів, Україна, індекс 79010
marta.kliushta@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-6960-3901

О.П. Хаврона,
кандидат біологічних наук,
доцент кафедри біологічної хімії;
ДНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького»,
вул. Пекарська, 69, м. Львів, Україна, індекс 79010
o.khavrona@gmail.com
https://orcid.org/0009-0002-0747-6354

ПРОТИВІРУСНІ ТА АНТИМІКРОБНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦИНКУ: БІОЛОГІЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ У СТОМАТОЛОГІЇ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Мета дослідження. *Узагальнити сучасні наукові дані щодо біологічної ролі цинку, його противірусних, антибактеріальних, протигрибкових та антибіоплівкових властивостей і оцінити перспективи застосування цинковмісних сполук у стоматології.* ***Матеріали та методи дослідження.*** *Проведено оглядово-аналітичний пошук наукової літератури з використанням публікацій, індексованих у PubMed та доступних через офіційні сторінки наукових видавців; додатково опрацьовано бібліографічні списки релевантних оглядів. Перевагу надавали систематичним оглядам, клінічним дослідженням та сучасним експериментальним роботам 2015–2025 років, а для фундаментальних положень залучали окремі раніші публікації. Аналіз охоплював біологічну роль цинку, противірусні механізми, антибактеріальну й антибіоплівкову активність Zn2+ і ZnO, а також застосування цинковмісних сполук у засобах гігієни, стоматологічних матеріалах, ендодонтії та імплантології.* ***Наукова новизна.*** *Систематизовано сучасні дані про цинк як чинник імунної відповіді та як компонент стоматологічних матеріалів, із розмежуванням фізіологічних, лабораторно підтверджених і клінічно продемонстрованих ефектів. Окремо узагальнено нові клінічні та експериментальні результати 2024–2025 років щодо цинковмісних засобів гігієни, ZnO-наноматеріалів і функціоналізованих стоматологічних матеріалів.* ***Результати.*** *Цинк бере участь у регуляції вродженого й адаптивного імунітету, підтриманні епітеліальних бар'єрів, контролі запалення та антиоксидантному захисті. Прямі противірусні ефекти Zn2+ описані переважно в експериментальних моделях і не повинні ототожнюватися з доведеною клінічною ефективністю системних добавок. Антибактеріальна та антибіоплівкова активність цинку залежить від хімічної форми, концентрації, доступності іонів і характеристик матеріалу. У стоматології найбільш обґрунтованим є використання цинковмісних компонентів у засобах гігієни порожнини рота та перспективних функціоналізованих матеріалах; однак для багатьох ZnO-наноматеріалів доказова база поки переважно експериментальна.* ***Висновки.*** *Цинк має значний потенціал у профілактиці та контролі мікробно-асоційованих процесів у порожнині рота, але його ефекти слід оцінювати залежно від конкретної сполуки, концентрації, способу застосування та клінічного контексту. Подальші дослідження мають бути спрямовані на стандартизацію концентрацій, оцінку довготривалої біосумісності та проведення добре спланованих клінічних випробувань.*

Ключові слова: *цинк; оксид цинку; ZnO-наночастинки; антимікробна активність; біоплівка; стоматологічні матеріали; гігієна порожнини рота.*

M. Yu. Kliushta,
PhD,
Assistant at the Department of Prosthetic Dentistry,
State Non-Commercial Enterprise «Danylo Halytsky Lviv National Medical University»,
69 Pekarska street, Lviv, Ukraine, postal code 79010,
marta.kliushta@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-6960-3901

O. P. Khavrona,
PhD,
Associate Professor of the Department of Biological Chemistry,
State Non-Commercial Enterprise «Danylo Halytsky Lviv National Medical University»,
69 Pekarska street, Lviv, Ukraine, postal code 79010,
o.khavrona@gmail.com
https://orcid.org/0009-0002-0747-6354

ANTIVIRAL AND ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF ZINC: BIOLOGICAL SIGNIFICANCE AND PROSPECTS FOR USE IN DENTISTRY (LITERATURE REVIEW)

Aim of the study. *To summarize current evidence on the biological role of zinc, its antiviral, antibacterial, antifungal and antibiofilm properties, and the prospects for using zinc-containing compounds in dentistry.* ***Materials and methods.*** *A narrative analytical review was prepared using scientific publications indexed in PubMed and available through official publisher platforms, supplemented by screening of reference lists of relevant reviews. Priority was given to systematic reviews, clinical studies and recent experimental publications from 2015–2025, while selected earlier studies were retained for foundational mechanisms. The analysis covered zinc biology, antiviral mechanisms, antibacterial and antibiofilm effects of Zn2+*

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

© М.Ю. Клюшта, О.П. Хаврона, 2026

and ZnO, and dental applications in oral-care products, restorative materials, endodontics and implantology. ***Scientific novelty.*** *Current evidence was synthesized with an explicit distinction between the physiological role of zinc, experimentally demonstrated antimicrobial effects and clinically supported outcomes. Recent 2024–2025 clinical and experimental studies on zinc-containing oral-care products, ZnO nanomaterials and functionalized dental materials were incorporated to update the evidence base.* ***Results.*** *Zinc contributes to innate and adaptive immunity, epithelial barrier integrity, inflammatory regulation and antioxidant defense. Direct antiviral effects of Zn2+ have mainly been demonstrated in experimental models and should not be equated with proven clinical efficacy of systemic zinc supplementation. Antibacterial and antibiofilm activity depends on chemical form, concentration, ion availability and material characteristics. In dentistry, the most clinically relevant applications include zinc-containing oral-care products, while many ZnO nanomaterial applications remain predominantly experimental.* ***Conclusions.*** *Zinc has substantial potential for prevention and control of microbially associated oral processes, but its effects should be interpreted according to the specific compound, concentration, route of application and clinical context. Further research should standardize concentrations, evaluate long-term biocompatibility and generate robust clinical evidence.*
Keywords*: zinc; zinc oxide; ZnO nanoparticles; antimicrobial activity; biofilm; dental materials; oral hygiene.*

Постановка проблеми. Мікробно-асоційовані захворювання залишаються однією з центральних проблем сучасної стоматології. Карієс, гінгівіт, пародонтит, періімплантатні ускладнення та інфекційні процеси, пов'язані з кореневими каналами або поверхнями стоматологічних конструкцій, значною мірою визначаються складною організацією мікробних біоплівок. Біоплівка забезпечує мікроорганізмам просторову організацію, обмін метаболітами та частковий захист від антисептиків, антибіотиків і факторів місцевого імунітету, що ускладнює тривалий контроль інфекційного процесу [1,2,3].

Пошук речовин, здатних впливати на мікробну колонізацію без надмірного ушкодження тканин, є одним із напрямів сучасної профілактичної стоматології та стоматологічного матеріалознавства. Цинк привертає увагу завдяки поєднанню есенціальної біологічної ролі та потенційної антимікробної активності. Він бере участь у функціонуванні численних білків та ферментів, регуляції транскрипції, клітинній проліферації, імунній відповіді та репарації тканин [4,5,6].

Для стоматології цинк має додаткове значення, оскільки його солі та оксид давно застосовують у засобах гігієни, цементах, матеріалах на основі цинк-оксид-евгенолу, ендодонтичних матеріалах та інших стоматологічних системах. Нові технології розширюють сферу його використання за рахунок наноструктурованих форм, функціоналізованих покриттів і композитів [1,2].

Водночас біологічна активність цинку не є синонімом клінічної ефективності. Результати досліджень різняться залежно від форми сполуки, концентрації, способу доставки, властивостей матеріалу та моделі дослідження. Особливо це стосується ZnO-наночастинок, для яких виражена антимікробна дія in vitro повинна оцінюватися разом із цитотоксичністю, механічними властивостями матеріалу та довготривалою біосумісністю [1,7,8,9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні огляди розглядають цинк як важливий регулятор імунної відповіді та взаємодії організму з інфекційними агентами. Дефіцит цинку може супроводжуватися порушеннями функцій нейтрофілів, макрофагів, натуральних кілерів і лімфоцитів, змінами продукції цитокінів та ослабленням бар'єрної функції епітелію [4,5,10].

Окремий напрям становить противірусна активність. Read et al. описали роль цинку в противірусному імунітеті, а te Velthuis et al. показали здатність Zn2+ пригнічувати активність РНК-залежної РНК-полімерази коронавірусів і артеривірусів in vitro [11,12]. Водночас систематичний огляд Cochrane 2024 року показав, що клінічний ефект цинку при застуді залежить від форми, дози та часу початку застосування; це є прикладом того, чому лабораторні механізми не можна автоматично переносити на клінічні рекомендації [13].

У стоматології доказова база найбільш виражена для засобів гігієни порожнини рота та для експериментальних матеріалів. Систематичний огляд Caruso et al. узагальнив дані про вплив цинку на оральне здоров'я [2]. Клінічні дослідження 2024–2025 рр. додатково оцінювали зубні пасти з цинком, вплив цинку на мікробіом зубного нальоту, цинквмісні системи для контролю гінгівіту та нові наноструктуровані матеріали [14,15,16,17].

ZnO-наночастинки активно досліджуються як модифікатори композитів, цементів, ортодонтичних конструкцій та імплантаційних поверхонь. Систематичний огляд Arun et al. показав, що додавання ZnO-наночастинок може підвищувати антибактеріальні властивості композитів, але результат залежить від концентрації та складу матеріалу

[8]. Нові дослідження 2025 року підтверджують перспективність ZnO у стоматологічних смолах, кальційвмісних цементах та покриттях, водночас демонструючи необхідність контролю механічних і біологічних властивостей [15,18].

Невирішені аспекти проблеми. Попри значний обсяг експериментальних даних, залишається недостатньо визначеним співвідношення між концентрацією цинку, антимікробною ефективністю та біосумісністю конкретного стоматологічного матеріалу. Для ZnO-наночастинок особливо важливими є стандартизація розміру та морфології частинок, умови вивільнення Zn2+, характеристики поверхні та оцінка довготривалої взаємодії з клітинами [1,7].

Другою невирішеною проблемою є неоднорідність клінічних досліджень цинквмісних засобів гігієни. Результати залежать від концентрації та форми цинку, базової формули продукту, тривалості використання, супутньої гігієни та клінічних характеристик пацієнтів [14,16,17]. Отже, актуальним є узагальнення доказів із чітким розмежуванням клінічно підтверджених ефектів і перспективних лабораторних технологій.

Мета дослідження: узагальнити сучасні наукові дані щодо противірусних та антимікробних властивостей цинку, охарактеризувати його біологічне значення та визначити перспективні й доказово обґрунтовані напрями застосування цинковмісних сполук у стоматології.

Матеріали та методи дослідження. Роботу виконано у форматі оглядово-аналітичного дослідження. Джерельну базу сформовано шляхом пошуку публікацій у PubMed та опрацювання релевантних бібліографічних списків; сучасні стоматологічні дослідження додатково верифіковано за офіційними сторінками видавців і бібліографічними записами. Пошук охоплював публікації переважно 2015–2025 років; окремі фундаментальні роботи попередніх років включено для опису базових механізмів цинкового гомеостазу та противірусної дії.

Ключові пошукові терміни включали zinc, zinc oxide, zinc nanoparticles, antiviral immunity, antibacterial activity, biofilm, oral health, dentistry, dental materials, gingivitis, oral malodor, dental composite, glass ionomer cement та implant coating. До аналізу включали систематичні огляди, наративні огляди, клінічні дослідження та експериментальні роботи, безпосередньо пов'язані з біологічною роллю цинку або його стоматологічним застосуванням. Не враховували дублікати, публікації без безпосереднього зв'язку з темою, а також джерела, які суперечать чинним вимогам журналу щодо використання наукових праць, опублікованих у росії чи білорусі.

Під час аналізу даних застосовано тематичне групування за п'ятьма напрямами: біологічна роль цинку та імунітет; противірусні механізми; антибактеріальна й антибіоплівкова активність; застосування у засобах гігієни та клінічній стоматології; застосування ZnO та інших цинковмісних форм у стоматологічних матеріалах. Окремо оцінювали рівень доказовості – від фундаментальних і лабораторних даних до клінічних результатів.

Результати та їх обговорення. Біол**огічна роль цинку.** Цинк належить до есенціальних мікроелементів, без яких неможливе нормальне функціонування клітин і тканин. Він бере участь у роботі ферментів, структурній стабілізації білків, регуляції транскрипції, клітинному поділі, диференціації, апоптозі, антиоксидантному захисті та імунній відповіді [4,5,6,10].

Дефіцит цинку асоціюється зі зниженням активності нейтрофілів, макрофагів, натуральних кілерів, Т-лімфоцитів і В-лімфоцитів. Порушення цинкового гомеостазу може призводити до змін продукції цитокінів, зниження ефективності клітинної імунної відповіді та погіршення бар'єрної функції епітелію [4,5,10].

У стоматологічному аспекті цинк має значення для підтримання стану слизової оболонки порожнини рота, тканин пародонта та процесів загоєння. Систематичний огляд 2024 року підтверджує широкий спектр біологічних ефектів цинку в контексті орального здоров'я [2,19].

Противірусні властивості цинку. Противірусна дія цинку має дві взаємопов'язані складові: підтримання адекватної імунної відповіді та можливу пряму дію іонів Zn2+ на окремі етапи вірусної реплікації. Цинк необхідний для функціонування клітин вродженого імунітету, регуляції Т-клітинної відповіді, продукції цитокінів та підтримання епітеліальних бар'єрів [6,10,11].

Одним із важливих напрямів противірусної активності є вплив цинку на внутрішньоклітинні сигнальні процеси та інтерферонову відповідь. За умов дефіциту цинку імунна відповідь може бути менш ефективною, що підвищує сприйнятливість до інфекцій [11,20,21].

Експериментальні дослідження показали, що підвищення доступності Zn2+ може пригнічувати активність РНК-залежної РНК-полімерази окремих РНК-вірусів. Для коронавірусів та арте-

ривірусів такий ефект продемонстровано in vitro [12]. Однак лабораторний ефект не означає, що звичайний прийом цинку забезпечує аналогічну концентрацію іонів у клітині.

Клінічні дані найбільш розвинені для звичайної застуди. Систематичний огляд Cochrane 2024 року показав, що цинк у певних формах може впливати на тривалість симптомів, однак результати залежать від форми, дози та часу початку лікування [13]. Тому в стоматології цинк доцільно розглядати як важливий мікроелемент і перспективний модифікатор противірусних механізмів, а не як специфічний противірусний препарат.

Антибактеріальна дія цинку. Антибактеріальні властивості цинку пов'язані з порушенням металевого гомеостазу бактерій, взаємодією Zn2+ з білками та ферментами, конкуренцією з іншими металами, змінами мембранних процесів і метаболізму [22]. Баланс між доступністю та токсичністю цинку є важливим компонентом взаємодії «хазяїн–патоген» [22,23]. Взаємодія цинку з антимікробними пептидами також може модифікувати локальну протимікробну відповідь [24].

Найбільш активно в стоматологічному матеріалознавстві досліджується оксид цинку, особливо у формі наночастинок. Запропоновані механізми включають контактне ушкодження мембран, генерацію активних форм кисню, взаємодію з білками та нуклеїновими кислотами, а також вивільнення Zn2+ [1,7].

Ефективність ZnO-наночастинок залежить від розміру, концентрації, морфології, площі поверхні, pH та складу середовища. Тому результати різних експериментів не завжди можна безпосередньо порівнювати. Систематичний огляд композитів показав потенціал підвищення антибактеріальної активності після додавання ZnO, але наголосив на необхідності контролю механічних властивостей [8].

Нові роботи 2025 року підтверджують перспективність ZnO у стоматологічних смолах і цементах. Leite et al. описали тривалу антимікробну активність експериментальних смол із ZnO-наночастинками [15], тоді як Nabavizadeh et al. показали, що додавання ZnO до кальційзбагаченого цементу змінює його фізико-хімічні та механічні характеристики [18].

Антибіоплівковий потенціал цинку. Біоплівка є однією з ключових форм існування мікроорганізмів у порожнині рота. Її організація забезпечує мікробам захист від антисептиків, антибіотиків, імунних факторів і механічного впливу [1,2].

Цинк може впливати на адгезію бактерій до поверхонь, накопичення мікробної маси, структуру біоплівки та метаболічну активність її компонентів. Для ZnO-наночастинок антибіоплівкова дія часто пов'язана з поєднанням контактного ушкодження клітин та вивільнення Zn2+ [1,7].

Дослідження ZnO-наночастинок охоплюють різні стоматологічні поверхні та матеріали. Важливо, що антибіоплівковий ефект має оцінюватися разом із механічними, фізико-хімічними та біологічними властивостями матеріалу [8,9,25].

Застосування цинку у стоматологічній практиці. У стоматології цинк застосовується як біологічно активний мікроелемент і як компонент матеріалів. Використовуються солі цинку в зубних пастах та ополіскувачах, оксид цинку в цементах і матеріалах на основі цинк-оксид-евгенолу, а ZnO-наночастинки досліджуються у композитах, склоіономерних цементах, ендодонтичних матеріалах, ортодонтичних конструкціях та імплантаційних покриттях [1,2]. Антибактеріальні властивості стоматологічних композитів із ZnO-наночастинками також були продемонстровані в експериментальних моделях [26].

При гінгівіті цинк найчастіше застосовується у складі засобів щоденної гігієни. Рандомізоване подвійне сліпе дослідження 2024 року показало, що зубна паста з 2% цитрату цинку протягом трьох місяців впливала на показники стану ясен і кількість окремих бактерій, пов'язаних із гінгівітом та пародонтитом [14]. У 2025 році Adams et al. досліджували вплив пасти з цитратом цинку на мікробіом зубного нальоту та його функціональні характеристики [16].

Цинквмісні засоби доцільно розглядати як компонент комплексної профілактики, а не як заміну механічному контролю біоплівки чи професійному пародонтологічному лікуванню. Результати клінічних випробувань багатокомпонентних режимів догляду також підтримують потенційну користь цинквмісних формул, але внесок саме цинку необхідно оцінювати з урахуванням усіх компонентів продукту [14,16].

При галітозі цинк має окрему перевагу, оскільки зв'язує леткі сірковмісні сполуки. Клінічне дослідження зубної пасти та ополіскувача з лактатом цинку продемонструвало зменшення показників орального запаху [27]. За наявності пародонтиту, карієсу, ксеростомії або ЛОР-патології цинк не замінює етіологічного лікування.

У реставраційних матеріалах ZnO-наночастинки розглядають як функціональний наповнювач із потенційною антибактеріальною

дією. Додавання ZnO може знижувати мікробну активність, але оптимальна концентрація визначається компромісом між антимікробним ефектом і механічними властивостями [8,9,25].

У 2025 році ZnO-наноматеріали досліджували у стоматологічних смолах, ортодонтичних конструкціях та керамічних композитах. Роботи Gharibnavaz et al. та Jimenez et al. демонструють перспективу створення поверхонь і реставраційних матеріалів із додатковими антибактеріальними властивостями, але їхня доказова база переважно експериментальна [28].

В ендодонтії цинк традиційно представлений матеріалами на основі цинк-оксид-евгенолу. Нові дослідження ZnO-наночастинок у кальційвмісних цементах розширюють напрям функціоналізації ендодонтичних матеріалів, але потребують підтвердження стабільності, герметичності, механічних характеристик і біосумісності [1,18].

В імплантології перспективним напрямом є створення цинквмісних антибактеріальних покриттів. Дослідження Malheiros et al. 2025 року показало потенціал цинк-допованого покриття для функціоналізації титанових імплантаційних поверхонь [29]. Однак клінічна ефективність таких технологій ще потребує підтвердження.

Безпечність та обмеження застосування. Надмірне системне надходження цинку може спричиняти нудоту, диспепсію та порушення обміну міді, а тривале передозування – гематологічні й імунні порушення [6,13]. У стоматологічних засобах концентрації та експозиція відрізняються від системного прийому, тому безпечність необхідно оцінювати окремо для кожної форми.

Для ZnO-наночастинок ключовими питаннями залишаються цитотоксичність, вивільнення іонів, розмір частинок, поверхневі характеристики та довготривала взаємодія з тканинами. Висока антимікробна активність in vitro не повинна автоматично трактуватися як клінічна перевага, якщо вона супроводжується зниженням біосумісності [1,7,30].

Необхідно розрізняти харчовий цинк, системні добавки, місцеві засоби гігієни, стоматологічні матеріали та наночастинки ZnO. Ці форми мають різну біодоступність і різні механізми дії, тому результати досліджень одного типу препарату не можна безпосередньо переносити на інший [2,7,11,13].

Висновки:

1. Цинк є есенціальним мікроелементом, який бере участь у регуляції вродженого й адаптивного імунітету, підтриманні епітеліальних бар'єрів, репарації тканин та контролі запалення

2. Противірусні ефекти цинку включають підтримання імунної відповіді та, за певних експериментальних умов, пряме пригнічення окремих вірусних ферментів. Прямі механізми переважно продемонстровані in vitro і не повинні ототожнюватися з доведеною клінічною ефективністю системного цинку.

3. Антибактеріальна та антибіоплівкова дія цинку пов'язана з порушенням металевого гомеостазу, взаємодією з ферментними системами й мембранами, а для ZnO – також із властивостями наноповерхні та вивільненням Zn2+.

4. Найбільш клінічно релевантними стоматологічними застосуваннями є цинквмісні зубні пасти та ополіскувачі для контролю нальоту, гінгівіту й орального запаху. Сучасні клінічні дослідження підтримують перспективність такого підходу, хоча ефект залежить від конкретної формули засобу.

5. ZnO-наночастинки та цинквмісні покриття мають значний потенціал у реставраційних матеріалах, цементах, ортодонтичних системах та імплантології, однак значна частина доказів залишається експериментальною. Подальше впровадження потребує стандартизованої оцінки механічних властивостей, цитотоксичності, біосумісності та клінічної ефективності.

6. Цинк доцільно розглядати як перспективний компонент комплексної профілактики та стоматологічного матеріалознавства, а не як універсальну альтернативу противірусним препаратам, антибіотикам або професійному стоматологічному лікуванню.

References:

1. Pushpalatha, C., Suresh, J., Gayathri, V.S., Sowmya, S.V., Augustine, D., Alamoudi, A., & et al. (2022). Zinc oxide nanoparticles: a review on its applications in dentistry. *Front Bioeng Biotechnol,* 10, 917990. DOI:10.3389/fbioe.2022.917990.

2. Caruso, S., Valenti, C., Marinucci, L., Di, Pasquale, F., Truppa, C., Di Benedetto, G., & et al. (2024). Systematic review of zinc's benefits and biological effects on oral health. *Materials*, 17(4), 800. DOI: 10.3390/ma17040800.

3. Uwitonze, A.M., Ojeh, N., Murererehe, J., Atfi, A., & Razzaque, M.S. (2020). Zinc adequacy is essential for the maintenance of optimal oral health. *Nutrients*, 12(4), 949. DOI: 10.3390/nu12040949.

4. Wessels, I., Maywald, M., & Rink, L. (2017). Zinc as a gatekeeper of immune function. *Nutrients*, 9(12), 1286. DOI: 10.3390/nu9121286.

5. Prasad, A.S. (2008). Zinc in human health: effect of zinc on immune cells. *Mol Med,* 14(5-6), 353-357. DOI: 10.2119/2008-00033.

6. Bonaventura, P., Benedetti, G., Albarède, F., & Miossec, P. (2015). Zinc and its role in immunity and inflammation. *Autoimmun Rev,* 14(4), 277-285. DOI:10.1016/j.autrev.2014.11.008.

7. Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N.H.M., Ann, L.C., Bakhori, S.K.M., & et al. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. N*ano-Micro Lett,* 7, 219-242. DOI: 10.1007/s40820-015-0040-x.

8. Arun, D., Adikari, Mudiyanselage, D., Gulam, Mohamed, R., Liddell, M., Hassan, N.M.M., & Sharma, D. (2021). Does the addition of zinc oxide nanoparticles improve the antibacterial properties of direct dental composite resins? A systematic review. *Materials*, 14(1), 40. DOI: 10.3390/ma14010040.

9. Malekhoseini, Z., Rezvani, M.B., Niakan, M., Atai, M., Bassir, M.M., Alizade, H.S., & Siabani, S. (2021). Effect of zinc oxide nanoparticles on physical and antimicrobial properties of resin-modified glass ionomer cement. *Dent Res J,* 18(1), 73. DOI: 10.4103/1735-3327.326646.

10. Shankar, A.H., & Prasad, A.S. (1998). Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *Am J Clin Nutr,* 68(2), 447S-463S. DOI: 10.1093/ajcn/68.2.447S.

11. Read, S.A., Obeid, S., Ahlenstiel, C., & Ahlenstiel, G. (2019). The role of zinc in antiviral immunity. *Adv Nutr,* 10(4), 696-710. DOI: 10.1093/advances/nmz013.

12. te Velthuis, A.J.W., van den Worm, S.H.E., Sims, A.C., Baric, R.S., Snijder, E.J., & van Hemert, M.J. (2010). Zn2+ inhibits coronavirus and arterivirus RNA polymerase activity in vitro and zinc ionophores block the replication of these viruses in cell culture. *PLoS Pathog,* 6(11), e1001176. DOI: 10.1371/journal.ppat.1001176.

13. Nault, D., Machingo, T.A., Shipper, A.G., Antiporta, D.A., Hamel, C., Nourouzpour, S., & et al. (2024). Zinc for prevention and treatment of the common cold. *Cochrane Database Syst Rev,* 5, CD014914. DOI: 10.1002/14651858.CD014914.pub2.

14. Zhou, Y., Zhou, Y., Liao, B., Chen, X., Niu, Y., & Ren, B. (2024). Effects of toothpaste containing 2% zinc citrate on gingival health and three related bacteria: a randomized double-blind study. *Clin Exp Dent Res,* 10(6), e70020. DOI: 10.1002/cre2.70020.

15. Leite, M.L., Comeau, P., Zaghwan, A., Shen, Y., & Manso, A.P. (2025). Long-lasting antimicrobial effect of multipurpose ZnO nanoparticle-loaded dental resins enhanced by blue light photodynamic therapy. *Dent Mater,* 41(3), 347-355. DOI: 10.1016/j.dental.2024.12.006.

16. Adams, S.E., Cawley, A.K., Arnold, D., Hoptroff, M.J., Slomka, V., Matheson, J.R., & et al. (2025). A randomised, double-blind clinical study into the effect of zinc citrate trihydrate toothpaste on oral plaque microbiome ecology and function. *Sci Rep,* 15(1), 8136. DOI: 10.1038/s41598-025-92545-0.

17. Alkaya, B., Kayhan, H.G., Demirbilek, F., Sahin, M., Totik, N., Ozcan, M., & Teughels, W. (2025). Clinical effects of zinc-containing stents on gingivitis: a randomised controlled trial. *Oral Health Prev Dent,* 23, 577-584. DOI: 10.3290/j.ohpd.c_2275.

18. Nabavizadeh, M., Abbaszadegan, A., & Zebardast, F. (2025). Effect of zinc oxide nanoparticles on calcium-enriched mixture cement: physical, chemical, and mechanical properties. I*ran Endod J,* 20(1), e23. DOI: 10.22037/iej.v20i1.46475.

19. Stefanache, A., Lungu, I.I., Butnariu, I.A., Calin, G., Gutu, C., Marcu, C., & et al. (2023). Understanding how minerals contribute to optimal immune function. *J Immunol Res*, 2023, 3355733. DOI: 10.1155/2023/3355733.

20. Sadeghsoltani, F., Mohammadzadeh, I., & Safari, M.M. (2022). Zinc and respiratory viral infections: important trace element in anti-viral response and immune regulation. *Biol Trace Elem Res,* 200(6), 2556-2571. DOI: 10.1007/s12011-021-02859-z.

21. Skalny, A.V., Rink, L., Ajsuvakova, O.P., Aschner, M., Gritsenko, V.A., Alekseenko, S.I., & et al. (2020). Zinc and respiratory tract infections: perspectives for COVID-19. *Int J Mol Med,* 46(1), 17-26. DOI: 10.3892/ijmm.2020.4575.

22. Lonergan, Z.R., & Skaar, E.P. (2019). Nutrient zinc at the host-pathogen interface. *Trends Biochem Sci,* 44(12), 1041-1056. DOI: 10.1016/j.tibs.2019.06.010.

23. Alamir, O.F., Oladele, R.O., & Ibe, C. (2021). Nutritional immunity: targeting fungal zinc homeostasis. *Heliyon*, 7(8), e07805. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07805.

24. Donaghy, C., Javellana, J.G., Hong, Y.J., Djoko, K., & Angeles-Boza, A.M. (2023). The synergy between zinc and antimicrobial peptides: an insight into unique bioinorganic interactions. *Molecules*, 28(5), 2156. DOI: 10.3390/molecules28052156.

25. Hojati, S.T., Alaghemand, H., Hamze, F., Ahmadian, Babaki, F., Rajab-Nia, R., Rezvani, M.B., & et al. (2013). Antibacterial, physical and mechanical properties of flowable resin composites containing zinc oxide nanoparticles. *Dent Mater,* 29(5), 495-505. DOI: 10.1016/j.dental.2013.03.011.

26. Aydin, Sevinç, B., & Hanley, L. (2010). Antibacterial activity of dental composites containing zinc oxide nanoparticles. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater,* 94B(1), 22-31. DOI:10.1002/jbm.b.31620.

27. Srisilapanan, P., Roseman, J., & Likitsatian, T. (2019). Clinical effect of toothpaste and mouth rinse containing zinc lactate on oral malodor reduction. *J Clin Exp Dent,* 11(4), e346-e352. DOI: 10.4317/jced.55418.

28. Gharibnavaz, M., Arash, V., Pournajaf, A., Najafi, F., Rahmati, Kamel, M., & Seyedmajidi, S. (2025). Study on the antibacterial properties and optical characteristics of clear orthodontic aligners coated with zinc oxide and magnesium oxide nanoparticles. *Orthod Craniofac Res,* 28(3), 496-506. DOI: 10.1111/ocr.12899.

29. Malheiros, S.S., Borges, M.H.R., Rangel, E.C., Fortulan, C.A., da Cruz, N.C., Barao, V.A.R., &

Nagay, B.E. (2025). Zinc-doped antibacterial coating as a single approach to unlock multifunctional and highly resistant titanium implant surfaces. *ACS Appl Mater Interfaces,* 17(12), 18022-18045. DOI:10.1021/acsami.4c21875.

30. Osorio, R., Cardenas, A.F.M., Siqueira, F.S.F., Toledano-Osorio, M., Medina-Castillo, A., & Toledano, M. (2025). Zinc-doped polymeric nanoparticles in the treatment of dentin hypersensitivity: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial. *Dent Mater,* 41(8), 1027-1033. DOI: 10.1016/j.dental.2025.06.006.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.08.2026
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.09.2026
Дата публікації: 11.11.2026