

Оксана Клітинська, Ігор Розюк

*Кафедра стоматології післядипломної освіти
Навчально-наукового інституту стоматології та лабораторної медицини
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
м. Ужгород, Україна*

Аналіз застосування спектральних методів при відновленні твердих тканин зубів непрямыми реставраціями (огляд літератури)

▷ **Вступ.** Вибір непрямой реставрації у повсякденній клінічній практиці здебільшого ґрунтується на досвіді лікаря і доступності матеріалів, тоді як наукові дані щодо оптичних, біомеханічних та адгезійних властивостей системи «реставрація — зуб» накопичуються відокремлено і рідко знаходять відображення в стандартизованих протоколах. Це породжує розрив між рівнем наявних досліджень і реальною клінічною практикою, що негативно позначається на передбачуваності довгострокового результату лікування.

Мета роботи — систематизувати сучасні дані щодо спектральних, біомеханічних та адгезійних аспектів застосування непрямих реставрацій і на цій основі визначити перспективи їх інтеграції в єдиний клінічний алгоритм.

Матеріали та методи. Для літературного огляду було відібрано наукові статті за 2020–2025 роки, що індексуються у базах даних PubMed, Scopus та на видавничій платформі MDPI. Ключовими напрямками для пошуку джерел були: оптичні властивості твердих тканин зубів і реставраційних матеріалів; біомеханічна поведінка непрямих реставрацій під функціональним навантаженням; спектрофотометричні методи визначення кольору, а також способи підготовки зуба та його фіксації, зокрема техніки негайного запечатування дентину.

Виклад основного матеріалу. Встановлено, що оптичні властивості твердих тканин зуба є багатокомпонентними: флуоресценція, прозорість і метамеризм діють у взаємозв'язку та не можуть бути коректно оцінені без приладового спектрофотометричного вимірювання. При цьому умови проведення вимірювання, зокрема ступінь зволоженості зуба, здатні суттєво вплинути на отриманий результат, що вимагає уніфікації клінічного протоколу. Аналіз біомеханічних досліджень показав, що конструктивні рішення щодо обсягу перекриття горбків і вибір адгезивного протоколу безпосередньо визначають розподіл напружень у системі та стійкість реставрації до функціонального навантаження. Поєднання раціонального препарування з технікою глибокого підняття краю та негайним запечатуванням дентину виявилось найбільш ефективним із погляду захисту залишкових тканин. Протокол негайного запечатування дентину підтверджено як вагомий чинник зниження частоти післяопераційних ускладнень і підвищення якості адгезивного з'єднання завдяки захисту препаративної поверхні від контамінації у проміжний клінічний період. Непрямі реставрації мають доведені переваги перед прямими методами відновлення за біомеханічними й адгезійними показниками, а спектрофотометричний контроль є необхідним, а не факультативним компонентом клінічного протоколу.

Висновки. На сьогодні не виявлено інноваційного матеріалу, який може повністю повторити природні тканини зуба, тому перевірка кольору за допомогою спеціального приладу є обов'язковою складовою роботи. Для того, щоб правильно визначити непряму реставрацію, варто зважати на такі характеристики: по-перше, як вона виглядає, а по-друге, наскільки міцна і як добре фіксується. Водночас науково доведено, що найкращий результат забезпечує поєднання правильної підготовки зуба та негайного запечатування дентину перед фіксацією.

Ключові слова: адгезивні протоколи, відновлення зубів, метод скінченних елементів, спектрофотометрична стоматологія, колірна стабільність.



Актуальність

Лікування твердих тканин зубів із використанням непрямих реставрацій залишається одним із пріоритетних напрямів сучасної стоматології, що зумовлено зростанням естетичних вимог пацієнтів та необхідністю забезпечення довготривалої функціональної надійності відновлених зубів [1]. Незважаючи на широке клінічне застосування керамічних і композитних непрямих конструкцій, досі не існує єдиного підходу до обґрунтування їх вибору, який би інтегрував одночасно оптичні, біомеханічні та адгезійні критерії [2]. Проблема полягає в тому, що лікар-стоматолог під час планування реставрації змушений приймати рішення в умовах неповноти даних, оскільки стандартні методи визначення кольору не відображають реальних спектральних характеристик тканин зуба, а вибір матеріалу нерідко здійснюється без урахування його мінерального складу та впливу на якість адгезивного з'єднання [3–5]. Водночас клінічна практика демонструє, що ігнорування біомеханічних особливостей розподілу жувального навантаження призводить до передчасних сколів та переломів як реставрації, так і власних тканин зуба [6, 7].

Отже, для вирішення цієї проблеми необхідне комплексне наукове узагальнення щодо застосування непрямих реставрацій при лікуванні твердих тканин зубів, що, зі свого боку, може стати основою для стандартизації клінічних протоколів лікування.

Мета дослідження — систематизувати сучасні дані щодо спектральних, біомеханічних та адгезійних аспектів застосування непрямих реставрацій і на цій основі визначити перспективи їх інтеграції в єдиний клінічний алгоритм.

Методологія та методи дослідження

Ця стаття є оглядом 37 наукових джерел, метою якого є систематизація та критичний аналіз сучасних даних щодо використання спектральних методів і непрямих реставрацій у лікуванні твердих тканин зубів.

Пошук наукових публікацій здійснювався в міжнародних базах даних PubMed, Scopus та на видавничій платформі MDPI. Для формування пошукового запиту використовувались такі ключові слова та їх комбінації: *indirect restorations, spectrophotometry dentistry, shade matching, CAD/CAM restorations, color stability, translucency, biomechanical behavior, finite element analysis, adhesive protocols, immediate dentin sealing, fracture resis-*

tance, lithium disilicate, zirconia, composite resin і clinical performance. Пошук охоплював публікації за період із 2020 по 2025 роки, що дозволило зосередитись на актуальних даних із урахуванням сучасного стану цифрової стоматології та нових реставраційних матеріалів.

До огляду включались повнотекстові публікації у рецензованих журналах, що відповідали таким критеріям: наявність оригінальних клінічних або лабораторних даних щодо оптичних, біомеханічних або адгезійних характеристик непрямих реставраційних конструкцій, використання спектрофотометричних методів вимірювання, дослідження на постійних зубах людини або стандартизованих лабораторних зразках, публікації англійською мовою. З огляду виключалися тези конференцій, листи до редакції, публікації без рецензування, а також роботи, присвячені виключно тимчасовим зубам або імплантологічним конструкціям.

Відібрані публікації було систематизовано за чотирма тематичними блоками відповідно до завдань дослідження:

- 1) спектрофотометричні властивості твердих тканин зубів і реставраційних матеріалів, зокрема оцінка кольору, прозорості, флуоресценції та оптичної стабільності;
- 2) мінеральний склад твердих тканин та його вплив на адгезійний потенціал системи «реставрація — зуб»;
- 3) біомеханічна поведінка непрямих реставрацій під дією жувальних навантажень на основі даних 3D-скінченно-елементного аналізу й експериментальних досліджень міцності на злам;
- 4) сучасні підходи до підготовки зуба й фіксації непрямой реставрації, як визначальні чинники її довгострокової клінічної надійності.

У межах кожного тематичного блоку застосовувався порівняльний аналіз даних із виявленням узгоджених і суперечливих результатів між дослідженнями. При зіставленні спектрофотометричних показників враховувалась система вимірювання кольору CIELAB і порогові значення колірної різниці ΔE , прийняті в стоматологічній літературі як клінічно прийнятні ($\Delta E \leq 2,7$ за шкалою CIEDE2000) [8]. При аналізі біомеханічних досліджень зіставлялися моделі навантаження, умови скінченно-елементного моделювання та критерії оцінки напружень у системі «реставрація — цемент — зуб». Для клінічних досліджень основними показниками порівняння були виживаність реставрацій, частота ускладнень і терміни спостереження.

Виклад основного матеріалу дослідження

Проблема клініко-спектрального обґрунтування непрямих реставрацій активно досліджується в кількох взаємопов'язаних напрямках, кожен із яких формує окремий науковий пласт, що потребує інтеграції. Тверді тканини постійних зубів характеризуються складною оптичною структурою. Серед внутрішніх властивостей зуба, що визначають його колір, особливе значення мають прозорість, опалесценція, флуоресценція та метамеризм. Дентин демонструє вищу інтенсивність флуоресценції порівняно з емаллю, оскільки містить більшу кількість органічної речовини, що поглинає ультрафіолетове випромінювання та відбиває його у видимому спектрі [9].

Спектрофотометричні вимірювання твердих тканин здійснюються в координатах системи CIELAB, де параметри L*, a*, b* відображають відповідно світлість, зеленувато-червону та синювато-жовту осі кольору. Серед 2768 природних зубів, виміряних спектрофотометром Vita Easyshade, прилад демонстрував переважну класифікацію відтінків у специфічних діапазонах, що суттєво відрізнялися від результатів суб'єктивного визначення за допомогою стандартних кольорних шкал [10]. Це свідчить про те, що об'єктивне спектрофотометричне вимірювання дає значно точнішу картину реального кольору зубних тканин, ніж візуальна оцінка.

Важливим клінічним аспектом є вплив дегідратації тканин зуба на результати спектрофотометрії, оскільки під час препарування зуб висушується. Через це змінюються його оптичні властивості, що може призвести до неправильного підбору кольору реставрації. Цей чинник обов'язково потрібно враховувати під час стандартизації спектрофотометричних вимірювань у клінічних умовах.

Мінеральний склад твердих тканин зуба безпосередньо визначає якість адгезивного з'єднання в системі «реставрація — зуб». Емаль, що складається переважно з гідроксиапатиту (близько 96 % неорганічного компонента), забезпечує стабільне кислотне протравлення з формуванням мікрорельєфу, що є оптимальним субстратом для адгезії [11]. Дентин, натомість, з його вищим вмістом органічних компонентів і дентинних каналців, є значно складнішим субстратом для бондингу.

Негайне запечатування дентину (IDS) підсилює формування та стабільність гібридного шару шляхом інфільтрації демінералізованого дентину адгезивними смолами. Цей мікромеханічний інтерфейс функціонує як якір для непрямих

реставрацій. На відміну від відстроченого запечатування, IDS забезпечує негайну інфільтрацію та полімеризацію адгезиву, захищаючи структуру дентину від деградації [5]. Отже, мінеральний склад дентину, зокрема ступінь його гідратації і щільність дентинних каналців, є визначальним чинником для вибору адгезивного протоколу при фіксації непрямих реставрацій. Наповнювачі (наприклад, кремнезем чи наночастинки) впливають на оптичні властивості: нерегулярні або великі за розміром наповнювачі зменшують параметр прозорості (TP) через розсіювання світла, тоді як нанонаповнювачі (наприклад, 20 нм в EO) мінімізують його розсіювання, що впливає на адгезійний потенціал системи «реставрація — зуб» шляхом зміни поверхневої взаємодії [4].

Для непрямих реставрацій підбір сучасних матеріалів суттєво відрізняється за їхніми оптичними характеристиками. Дослідження останніх років у цій галузі демонструють суттєвий прогрес. Наприклад, Дж. Х. Пак та ін., оцінюючи параметр прозорості та маскувальної здатності цирконію і дисилікату літію, встановили, що вибір матеріалу критично визначає естетичний результат за наявності дискольорованих тканин [12]. Спектрофотометричний аналіз маскувальної здатності адгезивних цементів під тонкими вінірами А. П. Перроні та ін. підтвердив, що фіксувальний матеріал є самостійним оптичним компонентом системи, а не лише механічним з'єднувачем [13]. Паралельно дослідження стабільності кольору CAD/CAM-блоків і 3D-друкованих матеріалів встановили, що термоцикловання й агресивне середовище по-різному впливають на різні класи матеріалів, що має пряме клінічне значення для довготривалого прогнозу [14, 15]. Виробники пропонують реставраційні матеріали в різних відтінках з оптичними властивостями, максимально наближеними до природних тканин зуба за параметрами кольору, хроми, значення, опалесценції, прозорості та флуоресценції. Однак на практиці значна частина сучасних естетичних матеріалів демонструє недостатній рівень флуоресценції, що може призводити до помітного метамеризму, коли реставрація добре інтегрується в денному світлі, але виглядає невідповідно в інших умовах освітлення.

Параметр прозорості (TP) сучасних композитних матеріалів коливається в діапазоні 8–21 для зразків завтовшки 3 мм, що відповідає літературним даним для матеріалів завтовшки менше ніж 2 мм [16]. Вищі значення TP вказують на більшу прозорість, що є критичним для імітації природної емалі, де TP становить близько 18,7 за товщини 1 мм. Такі чинники, як розмір і форма наповнювачів (наприклад, нерегулярні

в FO, сферичні/малі в EO) та органічна матриця (BIS-GMA, UDMA, TEG-DMA), впливають на розсіювання світла; вищий вміст наповнювачів або ближчі індекси заломлення (наприклад, BIS-GMA до кремнезему) знижують TP. Інтенсивність флуоресценції (FI) варіюється залежно від матеріалу: EL ($135,25 \pm 6,08$) > FO ($104,14 \pm 3,45$) > EO ($88,00 \pm 4,15$) > ED ($80,4 \pm 4,03$) > FZ ($46,60 \pm 2,91$), і вона зумовлена неорганічними наповнювачами (наприклад, люмінофорами як ітербій, церій) та органічною матрицею. У композитах FI часто перевищує природні рівні, особливо в емалевих відтінках, тоді як у природних зубах домінує флуоресценція дентину; старіння знижує FI композитів на $\sim 70\%$ за 10 років через гідроліз матриці, на відміну від стабільної природної флуоресценції [16]. Дослідження 3D-друкованих керамічно-підсиленних композитних смол показали, що більшість матеріалів демонстрували значення ΔE вище порогу помітності ($\Delta E = 1,2$) після впливу кислотного середовища та чищення зубів, а найнижче значення ΔE спостерігалось для матеріалу LU в кислоті ($\Delta E = 1,11 \pm 0,39$), тоді як найвище — для T2 у воді ($\Delta E = 2,09 \pm 1,47$) [14]. Ці дані свідчать про те, що стабільність кольору різних класів матеріалів суттєво варіюється та має враховуватися при плануванні реставрації.

Порівняльний аналіз методів визначення кольору переконливо підтверджує провідну роль спектрофотометрії. Окремим і динамічно зростаючим напрямом є цифрова її модифікація. Спектрофотометр зберігає статус золотого стандарту точності визначення кольору, перевершуючи інтраоральні сканери, системи штучного інтелекту та мобільні додатки за показниками точності відтворення і внутрішньоінструментальної надійності [17, 18]. Водночас дослідження С. Хачіалі та ін. щодо впливу дегідратації [19] та порівняння колориметричних приладів, виконане А. Данг та ін. [20] вказують на те, що клінічні умови вимірювання суттєво модифікують отримані показники. Систематичний огляд встановив, що середнє значення колірної різниці (ΔE) відносно спектрофотометричних вимірювань становило 1,69, а коефіцієнт узгодженості Каппа (κ) між візуальним підбором кольору та спектрофотометрією був дуже низьким ($\kappa = 0,2$), що свідчить про суттєву розбіжність між суб'єктивною й об'єктивною оцінкою [3].

Калібрування та гармонізація кольорних вимірювань у стоматології із використанням напівпрозорих реставраційних матеріалів кольору зуба суттєво зменшують розбіжності між результатами вимірювань у різних дослідницьких центрах. Водночас спектрофотометрія має певні обмеження в клінічному застосуванні, оскільки прилади,

розроблені для аналізу плоских поверхонь, не є оптимальними для вимірювання криволінійних поверхонь природних зубів і реставрацій [21].

Спектрофотометрія (наприклад, Vita Easys-hade V) є точним методом визначення прозорості (TP) через показник ΔE^*ab на білому та чорному ілюмінаторах. Вона може використовуватися як альтернатива вимірюванню пропускання світла (T%) та забезпечує стандартизовані умови вимірювання (одна кімната, калібрування приладу). Для оцінки флуоресценції (FI) надійною та простішою методикою виявилася цифрова фотографія з ультрафіолетовим світлом (300–400 нм). Проте в цьому дослідженні вона не була безпосередньо порівняна з іншими цифровими інструментами, такими як колориметри [9].

Тривимірний скінченно-елементний аналіз є провідним методом дослідження розподілу напружень у системі «реставрація — цемент — зуб». У біомеханічному напрямі в межах 3D-скінченно-елементних досліджень системно вивчали вплив дизайну препарування, нахилу горбків і виду реставрації на розподіл напружень. Зокрема, праці, присвячені вивченню ендокоронок [22], онлеїв на премолярах [6] і непрямих композитних реставрацій [23] сформували доказову базу для вибору конструкції залежно від біомеханічних умов. Дослідження поведінки молярів із глибоким підняттям краю [24] та біоміметичних реставрацій під термомеханічним навантаженням [7] розширили розуміння меж застосування непрямих методів у складних клінічних ситуаціях. У дослідженні ендокоронок із різних CAD/CAM-матеріалів застосування аксіального та статичного оклюзійного навантаження дозволило оцінити модифіковані напруження за критерієм фон Мізеса на залишкових тканинах зуба, цементному шарі та реставраційних матеріалах. Найвищі значення внутрішніх і крайових невідповідностей були відзначені для групи цирконію ($100,3$ мкм та $102,65$ мкм відповідно), тоді як найнижче значення внутрішньої невідповідності спостерігалось для групи Nacera [25]. Порівняльний аналіз різних типів покриття горбків показав, що групи з покриттям усіх щічних горбків і покриттям усіх горбків демонстрували кращі характеристики розподілу напружень як за аксіального, так і за косоного навантаження, а значення міцності на злам у цих групах (1627 ± 358 Н та 1639 ± 355 Н відповідно) були статистично значуще вищими порівняно з іншими групами [26].

Системний метааналіз міцності непрямих реставрацій на злам встановив, що середня міцність на злам інлеїв становить $1923,45$ Н, онлеїв — 1644 Н, а оверлеїв — $1383,6$ Н. За типом матеріалу найвищу міцність демонструють рес-

таврації із нанокерамічної смоли (2478,7 Н) та гібридної кераміки (2108 Н), тоді як звичайна кераміка й композитна смола поступаються їм за цим показником [27].

Вибір конструкції непрямой реставрації і матеріалу безпосередньо визначає ступінь захисту залишкових тканин зуба від катастрофічних переломів. У разі використання кераміки як матеріалу ендокоронки напруження концентрувалися в емалі, дентині та самій ендокоронці. У дентині максимальні напруження локалізувалися в дистальних та язикових ділянках шийкової зони і накопичувалися у біфуркаційній ділянці та шийці зуба. Ендокоронки з композитного матеріалу демонстрували рівномірніший розподіл напружень і вищу міцність на злам [28]. Поєднання техніки глибокого підняття краю та негайного запечатування дентину суттєво покращує механічні характеристики системи. Середні значення міцності на злам становили $565,76 \pm 233,22$ Н для групи без застосування обох технік, $978,47 \pm 394,2$ Н — за умови використання лише IDS, $974,31 \pm 334,7$ Н — за використання лише глибокого підняття краю та $1108,21 \pm 292,41$ Н — при поєднанні обох технік. Водночас обидва чинники статистично значуще підвищували міцність на злам [29].

Протокол адгезивної фіксації є одним із найважливіших чинників довгострокової надійності непрямих реставрацій. Щодо клінічної ефективності, систематичні огляди та рандомізовані клінічні дослідження підтвердили переваги непрямих реставрацій за показниками виживаності й частоти ускладнень [1, 30], а 10-річне дослідження Н.Текче та ін. уперше надало довгострокові порівняльні дані для каріозних порожнин І класу [31]. Однак більшість цих робіт розглядають клінічні результати без урахування спектральних характеристик як прогностичного чинника. У протоколах підготовки та фіксації ключову роль відіграють дослідження негайного запечатування дентину [32], техніки COMBO [33] та біоміметичних адгезивних стратегій [2], які демонструють, що саме обрана методика, а не лише матеріал реставрації, визначає механічну міцність і герметичність системи. Систематичний огляд і метааналіз, який охопив 11 клінічних досліджень, довів, що рівень клінічних ускладнень був нижчим за умови негайного запечатування дентину порівняно з протоколами без запечатування. Показник виживаності реставрацій у разі застосування протоколу IDS становив від 96,4 % до 100 %, тоді як за відстроченого запечатування — від 81,8 % до 96,7 % [34].

Механізм переваги IDS над відстроченим запечатуванням дентину пов'язаний із захистом

свіжопрепарованого дентину від контамінації. За відстроченого запечатування дентин піддається впливу слини, крові та тимчасового цементу, що порушує якість гібридного шару. Залишки тимчасового цементу можуть зберігатися на поверхні дентину та інфільтрувати його структуру, внаслідок чого остаточна реставрація фіксується не до свіжопрепарованого, а до контамінованого дентину, що знижує міцність адгезивного з'єднання. Порівняльне дослідження підтвердило, що застосування протоколу IDS, який передбачає протравлення дентину 37 % фосфорною кислотою впродовж 15 секунд із подальшим нанесенням праймера й адгезиву та повторною полімеризацією після нанесення кисневого бар'єра, що забезпечує формування захищеного й оптимально підготовленого субстрату для фінальної фіксації непрямой реставрації [35].

Клінічні дані переконливо підтверджують переваги непрямих реставрацій у довгостроковій перспективі. Клінічні ускладнення були статистично значуще менш поширеними у разі застосування протоколу IDS, а інтенсивність і частота післяопераційної чутливості були суттєво нижчими порівняно з реставраціями без негайного запечатування дентину або зі звичайною цементацією [36]. Ці результати є підставою для стандартизації протоколу IDS як обов'язкового компонента алгоритму виготовлення та фіксації непрямих реставрацій. Порівняно з прямими методами (наприклад, з використанням bulk-fill композитів), непрямі реставрації показують нижчу передачу напружень до емалі та дентину, що покращує біомеханічну стабільність і довгострокову надійність, особливо в складних порожнинах, де прямі матеріали накопичують вищі напруження на адгезивному інтерфейсі, ризикуючи маргінальним розпадом та адгезивною невдачею [37].

Таким чином, тип матеріалу для реставрації суттєво впливає на розподіл напружень у зубі. Жорсткіші матеріали, як-от непряма кераміка або деякі композити, мінімізують пікові напруження в твердих тканинах, тоді як bulkfill-композити часто створюють підвищене навантаження в структурі зуба та на межі з адгезивом. Під час вибору способу відновлення твердих тканин зуба варто враховувати ці особливості.

Наукова новизна цього дослідження полягає в тому, що вперше здійснено інтегрований аналіз спектральних характеристик твердих тканин постійних зубів в єдиній системі з оптичними та фізичними властивостями реставраційних матеріалів. На відміну від попередніх робіт, у яких біомеханічні дослідження та клінічні протоколи фіксації розглядалися як самостійні наукові на-

прями, у цій праці встановлено прямий зв'язок між мінеральним складом твердих тканин, їхніми спектрофотометричними показниками та якістю адгезивного з'єднання — тріадою, що визначає передбачуваність довгострокового результату лікування. Запропонований підхід забезпечує можливість інтегрувати спектральні дані в обґрунтування вибору реставрації, що раніше в літературі не розглядалося як єдина аналітична система.

Висновки

Тверді тканини зуба мають складні оптичні властивості, що включають флуоресценцію, прозорість і метамеризм. Кожна із цих складових діє як окремий чинник. Жоден сучасний матеріал не може повністю їх відтворити, тому контроль за допомогою спектрофотометра є обов'язковим на кожному етапі лікування.

Спектрофотометрія є точним способом визначити колір зуба, але її результати, здебільшого, залежать від рівня дегідратації тканин під час вимірювання. Тому важливо мати стандартизований протокол.

Конструкція та матеріал непрямой реставрації визначають розподіл напружень у системі «рес-

таврація — цемент — зуб». Поєднання раціонального перекриття горбків, глибокого підняття краю та негайного запечатування дентину забезпечує надійний біомеханічний захист тканин порівняно з прямими методами відновлення.

Негайне запечатування дентину підвищує довгострокову надійність фіксації, оскільки захищає препаровану поверхню від контамінації. Тому його доцільно інтегрувати в стандартні клінічні протоколи. Аналіз доступної літератури засвідчив відсутність інтегрованого підходу, що об'єднує спектральні, біомеханічні та адгезійні показники в єдину модель для прийняття клінічного рішення. У зв'язку з цим, перспективним напрямом подальших досліджень є розробка такої моделі.

Фінансування — немає.

Конфлікт інтересів — відсутній

Згода на публікацію

Автори ознайомлені з результатами і схвалили остаточний варіант рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори стверджують, що під час написання статті штучний інтелект не використовувався.

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Naik, V. B., Jain, A. K., Rao, R. D., & Naik, B. D. (2022). Comparative evaluation of clinical performance of ceramic and resin inlays, onlays, and overlays: A systematic review and meta analysis. *J Conserv Dent*, 25(4), 347–355. DOI: https://doi.org/10.4103/jcd.jcd_184_22.
2. Nikolova, N., Raykovska, M., Koytchev, E., & Gusiyska, A. (2025). Biomimetic strategies and adhesive protocols in the restoration of severely compromised posterior teeth — A contemporary review. *Journal of IMAB*, 31(4), 6542–6554. DOI: <https://doi.org/10.5272/jimab.2025314.6542>.
3. Rashid, F., Farook, T. H., & Dudley, J. (2023). Digital shade matching in dentistry: a systematic review. *Dent J (Basel)*, 11(11), 250. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj11110250>.
4. Teruel, J. D., Alcolea, A., Hernández, A., & Ruiz, A. J. O. (2015). Comparison of chemical composition of enamel and dentine in human, bovine, porcine and ovine teeth. *Arch Oral Biol*, 60(5), 768–775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2015.01.014>.
5. Agrawal, A., Nehal, R., Gala, K., & Sachdev, S. S. (2025). Immediate dentin sealing: advancing bonding efficacy and clinical success. *Cureus*, 17(1):e78102. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.78102>.
6. Pable, G., Saha, S. G., Saha, M. K., Agarwal, R. S., Meena, S. S., & Poddar, G. (2025). Comparative evaluation of stress distribution in maxillary premolar restored with onlay fabricated with different restorative materials — A three-dimensional finite element analysis study. *J Conserv Dent Endod*, 28(8), 783–789. DOI: https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_788_24.
7. Paruchuri, H., Ballullaya, S. V., Vadamodal, A. K., Shankar, P., & Donthireddy, B. K. R. (2025). Stress analysis of biomimetic restorations under thermomechanical loading using three-dimensional finite element analysis. *J Conserv Dent Endod*, 28(10), 1038–1044. DOI: https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_493_25.
8. Melgosa, M., Ruiz-López, J., Li, C., García, P. A., Della Bona, A., & Pérez, M. M. (2020). Color inconstancy of natural teeth measured under white light-emitting diode illuminants. *Dent Mater*, 36(12), 1680–1690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.10.001>.
9. Cruz, J., Eira, R., Coito, C., Sousa, B., & Cavalheiro, A. (2024). Fluorescence of esthetic resin composites: spectrophotometry and photography analysis techniques. *Eur J Dent*, 18(2), 485–492. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-1772244>.

10. Alvarado-Lorenzo, A., Criado-Pérez, L., Cano-Rosás, M., Lozano-García, E., López-Palafox, J., Alvarado-Lorenzo, M. (2024). Clinical comparative study of shade measurement using two methods: dental guides and spectrophotometry. *Biomedicines*, 12(4), 825. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines12040825>.
11. Talal, A., Nasim, H. M. O., & Khan, A. S. (2019). *Enamel etching and dental adhesives*. In: *Advanced Dental Biomaterials*. Elsevier, 229–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102476-8.00011-6>.
12. Park, J. H., Bang, H. J., Choi, N. H., & Park, E. J. (2022). Translucency and masking ability of translucent zirconia; comparison with conventional zirconia and lithium disilicate. *J Adv Prosthodont*, 14(5), 324–333. DOI: <https://doi.org/10.4047/jap.2022.14.5.324>.
13. Perroni, A. P., Barbon, F. J., Chaves, E. T., Alberton da Silva, S., de Moraes, R. R., & Boscato, N. (2024). Exploring the influence of tooth, ceramic, and resin luting agent variations on laminate veneer optical characteristics: a prospective clinical investigation. *Clin Oral Investig*, 28(12), 639. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00784-024-06032-3>.
14. Alnafaiy, S. M., Labban, N., Aldegheishem, A. S., Alhijji, S., Albaijan, R. S., AlResayes, S. S., et al. (2025). Effect of acidic environment and tooth brushing on the color and translucency of 3D-printed ceramic-reinforced composite resins for indirect restorations and hybrid prostheses. *Polymers*, 17(20), 2772. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17202772>.
15. Gad, M. A., Abdelhamid, A. M., ElSamahy, M., Abolghait, S., & Hanno, K. I. (2024). Effect of aging on dimensional accuracy and color stability of CAD-CAM milled and 3D-printed denture base resins: a comparative in-vitro study. *BMC Oral Health*, 24(1), 1124. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04848-9>.
16. Hirata, R., de Abreu, J. L., Benalcázar-Jalkh, E. B., Atria, P., Cascales, Á. F., Cantero, J. S., et al. (2024). Analysis of translucency parameter and fluorescence intensity of 5 resin composite systems. *J Clin Exp Dent*, 16(1): e71–e77. DOI: <https://doi.org/10.4317/jced.61174>.
17. Vitai, V., Németh, A., Teutsch, B., Kelemen, K., Fazekas, A., Hegyi, P., et al. (2025). Color comparison between intraoral scanner and spectrophotometer shade matching: a systematic review and meta-analysis. *J Esthet Restor Dent*, 37(2), 361–377. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.13309>.
18. Şahin, N., Kaleli, N., & Ural, Ç. (2025). Evaluation of color matching accuracy using artificial intelligence applications and a spectrophotometer: A photometric analysis. *J Prosthet Dent*, 134(5), 1955.e1–1955.e5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.07.013>.
19. Haciali, C., Korkut, B., & Yanikoglu, F. (2025). Clinical assessment of dental color during dehydration and rehydration by various dental photography techniques. *Odontology*, 113(4), 1558–1572. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10266-025-01081-w>.
20. Dang, A. D., Belles, D. M., Gonzalez, M. D., Aponte-Wesson, R. A., & Paravina, R. D. (2024). Repeatability of different mobile phone applications for color measurement in dentistry. *J Prosthodont*, 33(9), 908–917. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.13959>.
21. Tango, R. N., Volpato, C. A. M., Santos, K. F., Cesar, P. F., & Paravina, R. D. (2024). Harmonizing color measurements in dentistry using translucent tooth-colored materials. *BMC Oral Health*, 24(1), 173. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-03935-1>.
22. Gaafar, S. S., El Ballouli, D., Rayyan, M., Sayed, M., Basta, D. G., & Fouad, M. (2025). Fracture resistance, failure mode and restorability of CAD CAM Zirconia endocrowns with different pulpal extension depths bonded to maxillary molars: an in-vitro study. *BMC Oral Health*, 25(1), 176. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05466-9>.
23. Maravić, T., Josić, U., Comba, A., Mazzitelli, C., Bartoletti, L., Balla, I., et al. (2022). Finite element and in vitro study on biomechanical behavior of endodontically treated premolars restored with direct or indirect composite restorations. *Sci Rep*, 12(1), 12671. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16480-0>.
24. Bresser, R. A., Carvalho, M. A., Naves, L. Z., Melma, H., Cune, M. S., & Gresnigt, M. M. M. (2024). Biomechanical behavior of molars restored with direct and indirect restorations in combination with deep margin elevation. *J Mech Behav Biomed Mater*, 152, 106459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106459>.
25. El-Farag, S. A. A., Elerian, F. A., Elsherbiny, A. A., & Abbas, M. H. (2023). Impact of different CAD/CAM materials on internal and marginal adaptations and fracture resistance of endocrown restorations with: 3D finite element analysis. *BMC Oral Health*, 23(1), 421. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03114-8>.
26. Ruan, W., Zheng, Z., Jiang, L., He, J., Sun, J., & Yan, W. (2022). Optimal cuspal coverage of ceramic restorations using CAD/CAM: Biomechanical characteristic analysis by 3D finite element analysis and in vitro investigation. *Int J Comput Dent*, 25(3), 267–276. DOI: <https://doi.org/10.3290/j.ijcd.b2599709>.
27. Amesti-Garaizabal, A., Agustín-Panadero, R., Verdejo-Solá, B., Fons-Font, A., Fernández-Estevan, L., Montiel-Company, J., et al. (2019). Fracture resistance of partial indirect restorations made with CAD/CAM technology. A systematic review and meta-analysis. *J Clin Med*, 8(11), 1932. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm8111932>.

28. Zheng, Z., He, Y., Ruan, W., Ling, Z., Zheng, C., Gai, Y., et al. (2021). Biomechanical behavior of endocrown restorations with different CAD-CAM materials: A 3D finite element and in vitro analysis. *J Prosthet Dent*, 125(6), 890–899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.03.009>.
29. Al-Turki, L. E., Alsulimani, O. A., Baik, K. M., Othmani, H., Alqarni, N. M., Alqarni, A. A., et al. (2025). The influence of deep margin elevation and immediate dentin sealing on the fracture strength of premolars restored with indirect inlays: an in vitro study. *Clin Exp Dent Res*, 11(3):e70161. DOI: <https://doi.org/10.1002/cre2.70161>.
30. Rocha Gomes Torres, C., Moreira Andrade, A. C., Valente Pinho Mafetano, A. P., Stabile de Abreu, F., de Souza Andrade, D., Cintra Mailart, M., et al. (2022). Computer-aided design and computer-aided manufacturing indirect versus direct composite restorations: A randomized clinical trial. *J Esthet Restor Dent*, 34(5), 776–788. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.12820>.
31. Tekce, N., Demirci, M., Tuncer, S., Oğhan Türkoğlu, M., Turgut, V., Balci, S. N., et al. (2025). Clinical evaluation of direct and indirect restorations in class I cavities: a 10-year follow-up study. *BMC Oral Health*, 25(1), 1430. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06775-9>.
32. Ahmed, F., Farag, M. S., Haridy, M. F., Elezz, A. F. A., Ghoniem, A. F. (2023). Effect of immediate dentin sealing with air abrasion on post-operative sensitivity for indirect resin composite restorations. *Open Access Maced J Med Sci*, 11(D), 28–35. DOI: <https://doi.org/10.3889/oamjms.2023.11475>.
33. Chiodera, G., Monterubbiansi, R., Tosco, V., Papini, O., Orsini, G., & Putignano, A. (2024). Application of bulk-fill composite to simplify the cementation of indirect restorations: the COMBO technique. *Dent J*, 12(8), 239. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj12080239>.
34. Alghauli, M. A., Alqutaibi, A. Y., & Borzangy, S. (2025). Clinical benefits of immediate dentin sealing: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent*, 134(4), 996–1004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.03.014>.
35. Abdulsattar, Y. H., Kadhim, A. J. (2023). Effect of immediate dentin sealing on the fracture strength of indirect overlay restorations using different types of luting agents (a comparative in vitro study). *J Conserv Dent Endod*, 26(4), 434–440. DOI: https://doi.org/10.4103/jcd.jcd_226_23.
36. Teche, F. P. T., Valenzuela, E. B. S., Tavares, J. G., de Oliveira, E. W. C., Bittencourt, H. R., Burnett Júnior, L. H., et al. (2022). Immediate dentin sealing influences the fracture strength of ultrathin occlusal veneers made of a polymer-infiltrated ceramic network. *J Mech Behav Biomed Mater*, 133, 105331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105331>.
37. Fidancıoğlu, Y. D., Alkurt Kaplan, S., Mohammadi, R., Gönder, H. Y. (2025). Three-dimensional finite element analysis (fem) of tooth stress: the impact of cavity design and restorative materials. *Appl Sci*, 15(17), 9677. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15179677>.

Analysis of the Application of Spectral Methods in the Restoration of Hard Dental Tissues by Indirect Restorations: A Literature Review

Klitynska O., Roziuk I.

The Department of Dentistry of Postgraduate Education, Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

Introduction. The choice of indirect restorations in everyday clinical practice is largely based on the clinician's experience and the availability of materials, while scientific data on the optical, biomechanical, and adhesive properties of the "restoration-tooth" system are accumulated separately and are rarely reflected in standardized protocols. This creates a gap between available research and real clinical practice, which negatively affects the predictability of long-term treatment outcomes.

The aim of the work is to systematize current data on the spectral, biomechanical, and adhesive aspects of indirect restorations and, on this basis, to determine the prospects for their integration into a unified clinical algorithm.

Materials and methods. For the literature review, scientific articles published between 2020 and 2025 and indexed in the PubMed and Scopus databases were selected. The search strategy focused on the following key areas: the optical properties of hard dental tissues and restorative materials; the biomechanical behavior of indirect restorations under functional loading; spectrophotometric methods for color determination; and preparation and fixation methods, specifically dentin resealing.

Presentation of the main material. It has been established that the optical properties of hard dental tissues are multifaceted: fluorescence, translucency, and metamerism interact and cannot be properly assessed without instrumental spectrophotometric measurements. Furthermore, measurement conditions, particularly the degree of tooth moisture, can significantly affect the outcomes, highlighting the need for clinical protocol standardization. Analysis of biomechanical studies demonstrated that design solutions regarding cuspal overlap and the choice of the adhesive protocol

directly determine stress distribution within the system and the restoration's functional load resistance. The combination of rational preparation with the deep margin elevation technique and immediate dentin sealing was found to be highly effective in protecting residual tissues. The immediate dentin sealing protocol is confirmed to be a significant factor in reducing the incidence of postoperative complications and improving adhesive bond quality by protecting the prepared surface from contamination during the interim clinical period. Ultimately, indirect restorations demonstrate clear advantages over direct restorations in terms of biomechanical and adhesive parameters, and spectrophotometric control is a mandatory, rather than optional, component of the clinical protocol.

Conclusions. Currently, no modern material can completely replicate natural tooth tissues, making instrumental color verification a mandatory component of clinical practice. To ensure the predictability of indirect restorations, three critical factors must be considered: optical parameters, biomechanical strength, and the quality of adhesive fixation. At the same time, it has been scientifically proven that the best results are achieved by combining rational tooth preparation with immediate dentin sealing before final cementation.

Keywords: *adhesive protocols, dental restoration, finite element method, spectrophotometry in dentistry, color stability.*

**Стаття: надійшла до редакції 06.03.2026 р.;
прийнята до друку 14.04.2026 р.,
опублікована 29.05.2026 р.**

Клітинська Оксана Василівна

доктор медичних наук, професор,
професор кафедри стоматології
післядипломної освіти, ДВНЗ
«Ужгородський національний університет»
м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0000-0001-9969-2833>

Розюк Ігор Анатолійович

аспірант кафедри стоматології
післядипломної освіти, ДВНЗ
«Ужгородський національний університет»,
Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0009-0008-7254-3131>