

М. О. Вітавський; В. І. Савуляк, д-р техн. наук, проф.

ОСНОВНІ КРИТЕРІАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СТОМАТОЛОГІЧНИХ РЕСТАВРАЦІЙ

Стаття присвячена аналізу сучасних публікацій щодо підходів до класифікації та вибору матеріалів для використання в стоматологічній практиці. Показано, що значний перелік матеріалів для стоматології має відповідати певним критеріям, які формуються за об'єктивними та суб'єктивними показниками. Найбільш універсальними з них є функціональні критерії, серед яких ключовими є: механічна міцність, зносостійкість, хімічна інертність у порожнині рота, хороша адгезія до тканин зуба, стабільність кольору та відсутність токсичного впливу на організм. Розглянуто найбільш поширені системи матеріалів для зубних імплантатів: композити, керамічні матеріали, метали та їхні сплави, комбіновані реставраційні матеріали. Основними критеріями для вибору типу та марки матеріалу для реставраційних робіт на сьогодні є: біосумісність, механічна міцність, стійкість до зношування, хімічна інертність у порожнині рота, адгезія до тканин зуба, стабільність кольору та відсутність токсичного впливу на організм. Використання критеріїв вибору матеріалів для стоматологічних реставрацій для конкретного пацієнта залежить від комплексу показників, які включають його фізичний стан, алергічні реакції, фінансові можливості, вимоги до вигляду та естетики реставрації, можливості лікувального закладу тощо. Зроблено детальний розгляд властивостей, переваг та недоліків матеріалів різних систем. Комбіновані керамо-композитні матеріали є перспективними завдяки поєднанню переваг обох класів: підвищеній механічній міцності, термічній стабільності та поліпшеній естетиці. Основними напрямками подальших досліджень є вдосконалення технологій виробництва для забезпечення однорідності матеріалу, мінімізації внутрішніх напружень, а також розробка біоактивних систем для покращення функціональності та довговічності реставрацій. Впровадження інноваційних технологій (CAD/CAM, нанотехнологій, 3D-друку) створює передумови для підвищення якості стоматологічних реставрацій та персоналізації лікування. Комплексний підхід до вибору матеріалів із урахуванням їх технічних і клінічних характеристик є ключовим фактором успішного відновлення зубних тканин і забезпечення довготривалої функціональності реставрацій.

Ключові слова: стоматологічні матеріали, реставрація, композити, кераміка, метали, критерії вибору, міцність, біосумісність, естетичність.

Вступ

Проблема вибору матеріалів для стоматологічних реставрацій є актуальною як з точки зору клінічної стоматології, так і з позицій матеріалознавства та біоінженерії. У сучасних умовах розвитку технологій медичного призначення все більшу увагу приділяють розробці та оптимізації матеріалів, що поєднують високі експлуатаційні характеристики, біосумісність та довговічність. Стоматологічні реставраційні матеріали повинні відповідати ряду функціональних критеріїв, серед яких ключовими є механічна міцність, стійкість до зношування, хімічна інертність у порожнині рота, адгезія до тканин зуба, стабільність кольору та відсутність токсичного впливу на організм.

На ринку представлені різні групи матеріалів для стоматологічних реставрацій, зокрема фотополімерні композити, гібридні наноматеріали, склоіономерні цements, керамічні системи та інші. Кожен із них має специфічні властивості, які визначають їх доцільність використання в певних клінічних ситуаціях. При цьому остаточне рішення щодо вибору матеріалу базується на аналізі функціонального навантаження, локалізації реставрації, морфологічних особливостей зуба та індивідуальних характеристик пацієнта.

З огляду на зростаючу кількість нових розробок у галузі стоматологічних матеріалів, а також на потребу в їх систематизації, виникає необхідність проведення узагальненого

літературного огляду щодо функціональних критеріїв вибору цих матеріалів. Такий підхід дозволяє виділити актуальні наукові та технічні тенденції, проаналізувати ефективність наявних рішень, а також визначити перспективні напрями подальших досліджень у сфері медичного матеріалознавства.

Метою цієї статті є огляд сучасних досліджень, що стосуються функціональних властивостей матеріалів для стоматологічних реставрацій з акцентом на їх механічні, зносостійкі, біосумісні та естетичні характеристики. Аналіз наданої інформації дозволить клініцистам та дослідникам зробити обґрунтований вибір матеріалу для конкретних клінічних випадків, що сприятиме покращенню результатів лікування або буде поштовхом для розробки нового матеріалу.

Матеріали і методи. Для проведення цього огляду було виконано систематичний пошук сучасних публікацій у наукових базах даних, таких як PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar. Вибір статей здійснювався на основі їх релевантності до теми огляду та наявності даних, що стосуються механічних властивостей, біосумісності, зносостійкості та естетичних характеристик матеріалів. Відбір публікацій зосереджений на статтях, які містили експериментальні, та клінічні дослідження.

Фактичний матеріал збирався та оброблявся методами математичної статистики та планування експериментів на основі даних, отриманих авторами в процесі практичного використання матеріалів в умовах стоматологічної клініки м. Вінниці. Для виконання експериментальних досліджень механічних властивостей стоматологічних конструкцій та матеріалів розроблені спеціальні та використані стандартні установки. Для реалізації САД/САМ технологій використано обладнання лабораторії галузевого машинобудування ВНТУ.

Результати дослідження

Композитні матеріали є однією з найбільш широко застосовуваних груп реставраційних матеріалів, що завдяки своїм експлуатаційним властивостям поєднують естетику, механічну міцність та технологічну гнучкість. В основі композитних матеріалів для стоматологічних реставрацій лежить органічна полімерна матриця, модифікована неорганічним наповнювачем, а також компонентами для покращення адгезії та ініціаторами полімеризації [1 – 3]. За типом наповнювача та розміром частинок композити поділяють на мікрогібридні, мікронаповнені, наногібридні та нанопоповнені. У сучасній клінічній практиці перевага надається наногібридним та нанопоповненим композитам, які завдяки дрібнодисперсній структурі забезпечують високу зносостійкість, здатність поліруватися та естетичні властивості [4, 9]. Наповнювачі можуть бути представлені частинками скла, діоксиду кремнію, цирконію, а також модифікованими волокнами, що покращують механічні характеристики матеріалу. Зв'язування між матрицею і наповнювачем здійснюється за допомогою силанового агента, що формує стабільну хімічну адгезію, запобігаючи мікротріщинам та підвищуючи загальну міцність [5, 8]. Основними функціональними критеріями, за якими оцінюють композитні матеріали, є:

- Механічна міцність: Сучасні композити мають показники міцності на згин у межах 80 – 160 МПа, що дозволяє їх використання як у фронтальній, так і у боковій ділянках зубного ряду.

- Модуль пружності: Відповідність модулю пружності твердим тканинам зуба (особливо дентину) є важливою для зменшення напружень у зоні реставрації.

- Адгезія до емалі та дентину: Завдяки підсистемам покращення адгезії композити забезпечують стабільне з'єднання з тканинами зуба, що зменшує ризик мікропротікання та повторного карієсу.

- Зносостійкість: Композити з нанопоповненням мають підвищену стійкість до стирання, що є критично важливим у зонах підвищеного жувального навантаження.

– Стабільність кольору: Залежить від складу полімерної матриці, ступеня полімеризації та здатності матеріалу протистояти абсорбції барвників.

Технологічні аспекти. Полімеризація композитів зазвичай відбувається під дією світла у видимому спектрі (блакитного діапазону, ≈ 470 нм), за наявності фотополімеризуючих ініціаторів (камфорхінон та його похідні). Важливим технологічним параметром є глибина полімеризації, яка обмежує товщину нанесення матеріалу в один шар (не більше 2 мм для більшості систем). Крім того, композитні матеріали демонструють певні обмеження: полімеризаційна усадка (до 2 – 3 % за об'ємом), ризик виникнення мікротріщин, чутливість до точності виконання технології нанесення та вологи. Для вирішення цих проблем розробляються низькоусадкові системи на основі силорамів, ORMOCER-композитів тощо [6, 7 – 11].

Перспективи розвитку. Сучасні напрями розвитку композитних матеріалів орієнтовані на підвищення їх біоактивності, самовідновлюваних властивостей, а також інтеграцію наночастинок з антимікробним ефектом (наприклад, наночастинок срібла, цинку, гідроксиапатиту). Це відкриває нові можливості для профілактики ускладнень та подовження терміну експлуатації реставрацій.

Керамічні матеріали займають провідне місце серед стоматологічних реставраційних засобів, особливо у випадках, коли пріоритетними є естетичні показники та довговічність конструкції. Кераміка, як неорганічний, неметалевий матеріал, характеризується високою твердістю, хімічною інертністю, біосумісністю та стабільністю кольору, що робить її надзвичайно привабливою для використання у фронтальній та жувальній ділянках зубного ряду [12, 13].

З технічної точки зору стоматологічну кераміку класифікують за типом кристалічної фази, способом виготовлення та призначенням. Основними типами є:

– Фельдшпатові кераміки (на основі силікатів калію та натрію) – традиційна високотемпературна кераміка з чудовою прозорістю, застосовується для виготовлення вінірів та коронок.

– Лейцитвмісна кераміка – модифікована фельдшпатові система з покращеною механічною міцністю.

– Літійдисилікатна кераміка ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) – високопрозора кристалічна кераміка зі збалансованими оптичними й механічними властивостями, одна з найпоширеніших у CAD/CAM-реставраціях [14].

– Оксид цирконію (ZrO_2) – надміцна полікристалічна кераміка із згинальною міцністю понад 1000 МПа, яка використовується у мостоподібних протезах та імплантології [15].

Ключовими експлуатаційними характеристиками стоматологічної кераміки є:

– Міцність на вигин: від 100 МПа (фельдшпатові кераміка) до понад 1200 МПа (Y-TZP цирконієва кераміка).

– Твердість: 5 – 9 за шкалою Мооса, залежно від типу кераміки.

– Модуль пружності: 60 – 200 ГПа – що забезпечує стійкість до деформацій та розтріскування [16].

– Зносостійкість: кераміка демонструє мінімальні втрати об'єму в умовах жувального навантаження, що значно перевищує аналогічний показник композитів [17].

Сучасні методи обробки кераміки включають:

– Пресування за високих температур (інжекційне лиття) – застосовується для виготовлення монолітних коронок з літійдисилікату.

– CAD/CAM-технології – дозволяють проводити високоточне фрезерування блоків кераміки та скорочують час виготовлення. Такі блоки можуть бути попередньо спеченими або напівсинтезованими для подальшої кристалізації в печі [18].

– Ізостатичне пресування – застосовується для цирконієвих блоків, що дозволяє зменшити пористість і підвищити міцність.

Особливої уваги потребує цирконієва кераміка, яка завдяки своїй фазовій стабілізації має здатність до трансформаційного зміцнення. В умовах ризиків появи мікротріщин відбувається фазовий перехід тетрагональної структури в моноклінну, що супроводжується локальним розширенням і "закриттям" тріщини [19].

До основних переваг керамічних матеріалів належать:

- висока біосумісність з тканинами порожнини рота;
- стабільність кольору та відсутність поглинання барвників (фарбування);
- висока зносостійкість;
- можливість відновлення прозорості зуба.

Водночас, основними недоліками залишаються:

- підвищена крихкість фельдшпатових систем;
- складність обробки;
- необхідність точного виконання технології (технічного протоколу, особливо при фіксуванні за рахунок адгезії).

Перспективи розвитку. Інноваційні розробки у галузі стоматологічної кераміки орієнтовані на створення гібридних матеріалів – керамо-композитів з оптимальним поєднанням гнучкості й міцності. Також досліджується вплив наноструктурування поверхні на адгезивну здатність та біоактивність. Очікується зростання ролі 3D-друку з керамічних паст у персоналізованій стоматології.

Метали та їхні сплави вже понад століття займають важливе місце в стоматології завдяки поєднанню високих механічних властивостей, оброблюваності, біосумісності та стабільності в умовах ротової порожнини. З технічного погляду, ці матеріали використовуються для виготовлення ортопедичних конструкцій (коронки, мостів, бюгельних протезів), імплантатів, абатментів, елементів ортодонтичних апаратів, а також інструментів.

Стоматологічні метали поділяють на дві основні групи:

– Благородні метали – золото (Au), паладій (Pd), платина (Pt) та їхні сплави. Вони відзначаються хімічною інертністю, високою корозійною стійкістю та біосумісністю. Сплави золота традиційно використовуються для литих вкладок, мостів, коронок.

– Неблагородні (базові) метали – нікель (Ni), хром (Cr), кобальт (Co), титан (Ti) та їхні сплави. Основні переваги – висока механічна міцність, менша вартість, добрі експлуатаційні властивості [20].

Особливої уваги заслуговують сплави Co–Cr та Ni–Cr, які демонструють чудову зносостійкість і корозійну стабільність. Co–Cr сплави часто використовуються для бюгельних протезів завдяки їх високій пружності, а Ni–Cr – для каркасів металокерамічних коронок. Недоліком нікелевмісних сплавів є алергічні реакції у чутливих пацієнтів [21]. Титан та його сплави (переважно Ti-6Al-4V) мають оптимальне співвідношення між міцністю, корозійною стійкістю та біосумісністю, тому активно застосовуються для виготовлення імплантатів та ортопедичних конструкцій [22]. Чистий промисловий титан відзначається відмінною остеоінтеграцією завдяки утворенню пасивної оксидної плівки (TiO₂) [23]. Основні експлуатаційні характеристики стоматологічних матеріалів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Ключові експлуатаційні характеристики металевих стоматологічних матеріалів

Матеріал / Сплав	Границя міцності, МПа	Модуль пружності, ГПа	Твердість, HV	Щільність, г/см ³
Золото (сплав Au–Pt)	300 – 500	~90	150 – 200	15 – 19
Co–Cr	700 – 1000	210–230	400 – 600	8,3 – 9,2
Ni–Cr	600 – 850	180–200	350 – 500	8,0 – 8,5
Титан (Grade 2)	275 – 450	~105	150 – 200	4,5
Ti–6Al–4V	800 – 1000	~110	300 – 350	4,4 – 4,5

Метали для стоматології повинні відповідати ряду технічних критеріїв:

- висока механічна міцність та зносостійкість;
- корозійна стійкість у слині (pH 6,5 – 7,5);
- біосумісність та відсутність токсичних ефектів;
- стабільність розмірів після лиття або фрезерування;
- відповідність термічного КТР (коефіцієнта теплового розширення) кераміці при створенні металокерамічних конструкцій [24].

Метали обробляються переважно методами:

- лиття по виплавлюваних моделях;
- CAD/CAM фрезерування (Co–Cr, титан);
- селективне лазерне спікання (SLM) – для створення точних металевих каркасів;
- плазмове напилення – для покриттів імплантатів;
- електрохімічне полірування – для зниження шорсткості поверхні та поліпшення естетики [25,26].

Перспективи розвитку. Інноваційні дослідження у сфері металів для стоматології спрямовані на вдосконалення титанових сплавів з підвищеною біоактивністю, створення наноструктурованих покриттів, а також застосування біоінертних керамометалів з покращеними характеристиками з'єднання з кістковою тканиною. Зростає зацікавленість до використання біоактивних сплавів без нікелю, таких як Ti–Nb, Ti–Ta, для пацієнтів з алергією [27].

Комбіновані реставраційні матеріали, що інтегрують у своїй структурі як керамічні, так і композитні складові, представляють собою сучасний клас стоматологічних матеріалів, який об'єднує переваги обох базових систем. З технічної точки зору такі матеріали покликані забезпечити оптимальне поєднання механічних, оптичних та адгезивних властивостей для підвищення функціональності реставрацій.

Комбіновані матеріали можна класифікувати за ступенем інтеграції керамічних часток у матрицю композитної смоли:

1. Гібридні керамо-композити – містять керамічні мікро- або наночастки (зокрема літійдисилікат, цирконій, фільтровані склофілери), рівномірно розподілені у полімерній матриці. Завдяки цьому забезпечується високий рівень міцності на вигин (400 – 600 МПа), знижений коефіцієнт термічного розширення та покращена естетика.

2. Пористо-керамічні блоки із композитним просочуванням – це керамічні каркаси з відкритою пористістю, які після моделювання інфільтруються полімерними смолами для підвищення ударної в'язкості та тріщиностійкості.

3. Нанокompозитні системи з керамічними наночастинками розміром до 100 нм, що створюють високу щільність упаковки наповнювача і оптимізують механічні характеристики, зменшуючи внутрішні напруження в полімерній матриці.

Технічні характеристики:

- Механічні властивості: комбіновані матеріали демонструють покращену міцність на вигин (500 – 700 МПа), збільшену ударну в'язкість та підвищену стійкість до втомних

навантажень порівняно з традиційними композитами [28, 29].

- Термічна стабільність: завдяки наявності керамічних наповнювачів коефіцієнт теплового розширення комбінованих матеріалів значно більше наближений до тканин зуба, що мінімізує ризик розвитку мікротріщин і делямінації за температурних коливань [30].

- Адгезивні властивості: полімерна матриця забезпечує високу здатність до хімічного зв'язування з адгезивними системами та тканинами зуба, що покращує герметичність та тривалість фіксації реставрації.

- Оптичні характеристики: комбінація прозорих керамічних часток і композитної матриці дозволяє відтворити природну оптичність зуба, забезпечує відповідний рівень прозорості, люмінесценції та колірної стабільності [31].

Технології виготовлення:

- Методи лиття та пресування з подальшою полімеризацією композитної матриці;

- CAD/CAM фрезерування керамо-композитних блоків із подальшою полімеризацією під тиском і температурою для досягнення однорідної структури;

- Нанотехнології для синтезу наночастинок і їх рівномірного диспергування в полімері.

Перевагами комбінованих матеріалів є:

- високий рівень механічної міцності і стійкості до стирання;

- покращена естетика і біосумісність;

- зниження ризику виникнення тріщин завдяки підвищеній ударній в'язкості;

- можливість застосування як для прямих, так і непрямих реставрацій.

Однак наявні технічні виклики включають:

- складність технологічного контролю рівномірності дисперсії керамічних часток;

- ризик утворення внутрішніх напружень межах матриці під час полімеризації;

- високу вартість виробництва внаслідок використання високотехнологічного обладнання.

Перспективи розвитку. Дослідження в галузі комбінованих стоматологічних матеріалів фокусуються на підвищенні стабільності наноструктур, удосконаленні адгезивних систем і розробці нових полімерних матриць із покращеними фізико-механічними характеристиками. Важливим напрямком є створення біоактивних гібридних систем, що сприяють ремінералізації тканин зуба і запобігають розвитку вторинного карієсу [32].

Висновки

1. Аналіз сучасних стоматологічних матеріалів показує, що вибір оптимального матеріалу для реставрацій повинен базуватися на комплексному врахуванні функціональних критеріїв: механічних властивостей, біосумісності, адгезії та естетики.

2. Композитні матеріали характеризуються високою міцністю, адаптивністю до форми зуба та гарною адгезією, що робить їх ефективними для прямих реставрацій із високими вимогами до естетики.

3. Керамічні матеріали відзначаються винятковою біосумісністю та оптичною прозорістю, проте потребують суворого дотримання технологічних режимів для запобігання крихкості та тріщиноутворення.

4. Металеві сплави, особливо на основі титану, забезпечують високу механічну міцність та довговічність, що важливо для каркасів протезів та імплантатів.

5. Комбіновані керамо-композитні матеріали є перспективними завдяки поєднанню переваг обох класів: підвищеній механічній міцності, термічній стабільності та поліпшеній естетиці.

6. Основними напрямками подальших досліджень є вдосконалення технологій виробництва для забезпечення однорідності матеріалу, мінімізації внутрішніх напружень, а також розробка біоактивних систем для покращення функціональності та довговічності реставрацій.

7. Впровадження інноваційних технологій (CAD/CAM, нанотехнологій, 3D-друку)

створює передумови для підвищення якості стоматологічних реставрацій та персоналізації лікування.

8. Отже, комплексний підхід до вибору матеріалів із урахуванням їх технічних і клінічних характеристик є ключовим фактором успішного відновлення зубних тканин і забезпечення довготривалої функціональності реставрацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ferracane J. L. Resin composite – State of the art. *Dental Materials*. 2011. Vol. 27, № 1. P. 29–38.
2. Ilie N., Hickel R. Investigations on mechanical behavior of dental composites. *Clinical Oral Investigations*. 2009. Vol. 13, № 4. P. 427–438.
3. Nanocomposites for dental restorations / H. H. Xu et al. *Dental Materials*. 2020. Vol. 36, № 1. P. 1–12.
4. Mitra S. B., Wu D., Holmes B. N. An application of nanotechnology in advanced dental materials. *Journal of the American Dental Association*. 2003. Vol. 134, № 10. P. 1382–1390.
5. Cramer N. B., Stansbury J. W., Bowman C. N. Recent advances and developments in composite dental restorative materials. *Journal of Dental Research*. 2011. Vol. 90, № 4. P. 402–416.
6. Sol-gel materials for dental applications / N. Moszner et al. *Dental Materials*. 2008. Vol. 24, № 11. P. 1496–1505.
7. Post-polymerization shrinkage stress kinetics of dental composites / R. Z. Alshali et al. *Dental Materials*. 2015. Vol. 31, № 3. P. 278–285.
8. Білоус В. М., Журавльов А. В. Сучасні реставраційні матеріали у терапевтичній стоматології. *Сучасна стоматологія*. 2018. № 3 (89). С. 52–55.
9. Коваленко О. О., Савченко М. В. Клінічні аспекти застосування композитних матеріалів при реставрації каріозних уражень зубів. *Український стоматологічний альманах*. 2020. № 2. С. 73–76.
10. Павленко О. В., Мартинюк Н. Ю. Морфо-функціональні критерії вибору матеріалів для прямих реставрацій зубів. *Вісник стоматології*. 2017. № 2. С. 42–45.
11. Ярова Т. М., Кушнір С. С. Аналіз властивостей стоматологічних композитів нового покоління. *Вісник проблем біології і медицини*. 2021. № 3 (161). С. 286–290.
12. Ferracane J. L. Resin composite–State of the art. *Dental Materials*. 2011. Vol. 27, № 1. P. 29–38.
13. Mitra S. B., Wu D., Holmes B. N. An application of nanotechnology in advanced dental materials. *Journal of the American Dental Association*. 2003. Vol. 134, № 10. P. 1382–1390.
14. Cramer N. B., Stansbury J. W., Bowman C. N. Recent advances and developments in composite dental restorative materials. *Journal of Dental Research*. 2011. Vol. 90, № 4. P. 402–416.
15. Sol-gel materials for dental applications / N. Moszner et al. *Dental Materials*. 2008. Vol. 24, № 11. P. 1496–1505.
16. Головач І. І., Дроботенко І. С. Керамічні матеріали в ортопедичній стоматології: навч. посіб. Київ: Медицина, 2015. 168 с.
17. Ярова Т. М., Кушнір С. С. Аналіз властивостей стоматологічних композитів нового покоління. *Вісник проблем біології і медицини*. 2021. № 3 (161). С. 286–290.
18. Павленко О. В., Мартинюк Н. Ю. Морфо-функціональні критерії вибору матеріалів для прямих реставрацій зубів. *Вісник стоматології*. 2017. № 2. С. 42–45.
19. Denry I., Kelly J. R. State of the art of zirconia for dental applications. *Dental Materials*. 2008. Vol. 24, № 3. P. 299–307.
20. Поліщук Ю. М., Шнайдер В. І. Матеріали для ортопедичної стоматології: навч. посіб. Вінниця: Нова книга, 2016. 216 с.
21. Попович В. І. Використання сплавів на основі нікелю в стоматологічній практиці. *Український стоматологічний альманах*. 2019. № 4. С. 37–41.
22. Biomedical applications of titanium and its alloys / C. N. Elias et al. *JOM*. 2008. Vol. 60, № 3. P. 46–49.
23. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review / M. Geetha et al. *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54, № 3. P. 397–425.
24. Wataha J. C. Biocompatibility of dental casting alloys: a review. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2000. Vol. 83, № 2. P. 223–234.
25. Хоружий О. О., Степанюк С. П. Перспективи застосування селективного лазерного спікання у виготовленні стоматологічних каркасів. *Вісник проблем біології і медицини*. 2021. № 2 (160). С. 141–144.
26. Шнайдер В. І. Обробка стоматологічних металів: довідник. Київ: Медицина, 2017. 144 с.
27. Niinomi M. Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 1998. Vol. 243, № 1–2. P. 231–236.
28. Stawarczyk B., Ozcan K., Schmutz M. Mechanical properties and wear behavior of polymer-infiltrated ceramic-network materials. *Clinical Oral Investigations*. 2013. Vol. 17, № 8. P. 269–279.
29. Kelly J. R. Dental ceramics: Current thinking and trends. *Dental Clinics of North America*. 2004. Vol. 48, № 2. P. 513–530.

30. Zhang Y., Kelly T. M. Thermal expansion of dental ceramics and composites: implications for clinical performance. *Dental Materials*. 2016. Vol. 32, № 1. P. 16–25.
31. Ferracane J. L. Resin composite–state of the art. *Dental Materials*. 2011. Vol. 27, № 1. P. 29–38.
32. Vukadinovic D., Dimitrov A., Krasteva M. Bioactive restorative materials: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2019. Vol. 30, № 9. P. 1–16.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2025.

Стаття пройшла рецензування 28.06.2025.

Вітавський Максим Олександрович – аспірант кафедри галузевого машинобудування, e-mail: vit24asp@gmail.com.

Савуляк Валерій Іванович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, e-mail: korsav84@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.