

УДК 616.314-089.28:004.9

DOI <https://doi.org/10.35220/2523-420X/2026.1.4>**В.М. Халецька,**

кандидат медичних наук,
асистент кафедри дитячої стоматології,
Дніпровський державний медичний університет,
вул. Володимира Вернадського, 9, м. Дніпро, Україна,
індекс 49044, duz101.vk@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-8494-576X

С.С. Терехов,

асистент кафедри стоматології
Інститут післядипломної освіти,
Національний медичний університет
імені О.О. Богомольця,
бульвар Тараса Шевченка, 13, м. Київ, Україна,
індекс 01601
dr.terehov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4313-9497

Є.О. Строченко,

кандидат медичних наук,
доцент кафедри терапевтичної
та дитячої стоматології,
Одеський національний медичний університет,
вул. Рішельєвська, 11, м. Одеса, Україна, індекс 65000,
evgeniystrochenko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9698-2851

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ CAD/CAM-ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТРАДИЦІЙНИХ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРОНОК

Для ортопедичної стоматології принципове значення має досягнення балансу між цифровими та апробованими традиційними методами, що сприятиме підвищенню якості ортопедичного лікування й забезпеченню комфортності клінічного процесу як для лікаря, так і для пацієнта.

Мета дослідження – порівняльне оцінювання ефективності CAD/CAM-технологій і традиційних методів виготовлення коронок з урахуванням точності крайового прилягання, механічних властивостей матеріалів, клінічної ефективності та довговічності ортопедичних реставрацій.

Методи дослідження. Методологія дослідження ґрунтується на комплексному порівняльному аналізі CAD/CAM-технологій і традиційних методів виготовлення коронок у межах інтегрованої моделі «матеріал – технологія – клінічний результат». Оцінювано фізико-механічні властивості стоматологічних матеріалів та технологічні параметри виробництва з урахуванням джерел похибок і варіабельності результатів.

Результати. У дослідженні здійснено порівняльний аналіз CAD/CAM-технологій та традиційних підходів до виготовлення ортопедичних коронок із позицій

матеріалознавства, технології та клінічної практики. Встановлено, що матеріали, які застосовують у CAD/CAM-системах (діоксид цирконію, літій-дисилікат, гібридні кераміки), характеризуються стабільнішими й прогнозованішими механічними властивостями, що зумовлено стандартизованими умовами їхнього виробництва та однорідністю мікроструктури. Використання цифрових протоколів сприяє підвищенню точності й відтворюваності реставрацій, поліпшенню їхньої довговічності та раціоналізації клінічного робочого процесу. Водночас традиційні методи потребують ретельного технологічного контролю, проте зберігають доцільність у клінічних ситуаціях, що вимагають індивідуального підходу й розширених естетичних можливостей.

Висновки. Узагальнення отриманих результатів дало змогу сформулювати практичні рекомендації щодо раціонального вибору технології виготовлення коронок з урахуванням клінічних умов, матеріалознавчих характеристик і рівня технологічного оснащення стоматологічної практики.

Ключові слова: CAD/CAM-технології; традиційні методи виготовлення коронок; ортопедичні реставрації; точність прилягання; клінічна ефективність; довговічність коронок.

V.M. Khaletska,

Candidate of Medical Sciences,
Assistant at the Department of Pediatric Dentistry,
Dnipro State Medical University,
9 Volodymyra Vernadskoho street, Dnipro, Ukraine,
postal code 49044, duz101.vk@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-8494-576X

S.S. Terekhov,

Assistant at the Department of Stomatology, Institute
of Postgraduate Education,
O.O. Bogomolets National Medical University,
13 Tarasa Shevchenka boulevard, Kyiv, Ukraine,
postal code 01601
dr.terehov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4313-9497

Ye.O. Strochenko,

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor
at the Department of Therapeutic and Pediatric Dentistry,
Odessa National Medical University,
11 Risheliivska street, Odessa, Ukraine, postal code 65000,
evgeniystrochenko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9698-2851

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF CAD/CAM TECHNOLOGIES AND TRADITIONAL CROWN FABRICATION METHODS

For prosthodontics, achieving a balance between digital and well-established traditional methods is of fundamental importance, as it contributes to improving the quality of



prosthetic treatment and ensures clinical comfort for both the clinician and the patient.

Objective. The aim of this study was a comparative evaluation of the efficacy of CAD/CAM technologies and traditional methods of crown fabrication with regard to marginal fit accuracy, mechanical properties of materials, clinical efficacy, and longevity of prosthetic restorations.

Methods. The study methodology was based on a comprehensive comparative analysis of CAD/CAM technologies and traditional methods of crown fabrication within an integrated "material-technology-clinical outcome" model. The physicomechanical properties of dental materials and technological production parameters were evaluated, accounting for sources of error and result variability.

Results. A comparative analysis of CAD/CAM technologies and traditional approaches to the fabrication of prosthetic crowns was performed from the perspectives of materials science, technology, and clinical practice. It was established that materials used in CAD/CAM systems (zirconia, lithium disilicate, and hybrid ceramics) demonstrate more stable and predictable mechanical properties attributable to standardized manufacturing conditions and homogeneous microstructure. The use of digital protocols improves the accuracy and reproducibility of restorations, enhances their longevity, and streamlines the clinical workflow. Traditional methods, however, require careful technological control yet remain relevant in clinical situations that demand an individualized approach and expanded esthetic capabilities.

Conclusions. Synthesis of the obtained results enabled the formulation of practical recommendations for the rational selection of crown fabrication technology based on clinical conditions, materials science characteristics, and the level of technological instrumentation available in dental practice.

Key words: CAD/CAM technologies; traditional crown fabrication methods; prosthetic restorations; marginal fit accuracy; clinical efficacy; crown longevity.

Вступ. Ортопедична стоматологія перебуває на етапі трансформації: поряд із апробованими класичними методами виготовлення коронок інтенсивно розвиваються цифрові технології. Традиційні підходи, що ґрунтуються на ручних етапах роботи, упродовж десятиліть забезпечували клініцистам стабільні результати, проте вони залишаються трудомісткими й чутливими до похибок. Натомість CAD/CAM-системи (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing) забезпечують якісно новий рівень точності та швидкості завдяки поєднанню сканування, комп'ютерного моделювання й автоматизованого виробництва, що створює передумови для більш прогнозованих клінічних результатів [1, р. 1713–1715].

Попри очевидні переваги цифрових рішень, класичні методи зберігають актуальність, оскільки вони доступніші та часто незамінні у випадках складних індивідуальних реставрацій або за відсутності цифрового обладнання.

Основна проблема клінічної практики полягає в забезпеченні точності крайового прилягання та довговічності коронок. Т. Ф. Альгазаві (Т. F. Alghazzawi) наголошує, що навіть незначна похибка може спричинити вторинний карієс, руйнування цементу або зниження терміну служби реставрації [2, р. 78–80; 3, р. 30–32].

З огляду на це актуальним є порівняльне оцінювання ефективності CAD/CAM-технологій і традиційних методів за такими критеріями: точність крайового прилягання, механічні властивості, клінічна надійність та економічна доцільність. Такий аналіз дасть змогу визначити, у яких саме клінічних ситуаціях цифрові рішення мають реальну перевагу, а в яких класичні методи залишаються оптимальними. Результати дослідження становитимуть підґрунтя для формулювання практичних рекомендацій стоматологам-ортопедам, оптимізації робочих процесів та підвищення рівня задоволеності пацієнтів.

Аналіз наукових публікацій засвідчує виразну тенденцію до переосмислення ролі цифрових технологій в ортопедичній стоматології. CAD/CAM-системи дедалі частіше розглядають не лише як засіб пришвидшення лабораторних етапів, а як цілісну цифрову концепцію виготовлення ортопедичних конструкцій, що інтегрує внутрішньоротове сканування, комп'ютерне моделювання та автоматизоване фрезерування коронок. Експериментальні дослідження *in vitro* продемонстрували, що середні значення крайового зазору для коронок, виготовлених за CAD/CAM-технологією, зазвичай становлять 40–80 мкм, тоді як для конструкцій, отриманих традиційними методами, цей показник нерідко перевищує 100 мкм, що підтверджено результатами мікро-КТ та оптичної сканувальної мікроскопії [1, р. 1715–1716; 4, р. 6–8; 5, р. 442–445; 6].

Комплексність цього підходу уможливило досягнення вищої прогнозованості результатів і зменшення кількості клінічних ускладнень порівняно з традиційними методами [1, р. 1713–1715]. Аналогічну позицію підтримує Т. Ф. Альгазаві (Т. F. Alghazzawi) [2, р. 72–75], наголосивши, що CAD/CAM-технологія змінює логіку ортопедичного лікування, переводячи її в площину стандартизованих і контрольованих процесів. Встановлено, що відмова від класичних відбитків та гіпсових моделей усуває низку проміжних етапів, на яких традиційно виникають похибки, зумовлені деформацією матеріалів або неточністю ручного моделювання [2, р. 78–80; 7, р. 1518–1520]. Цифрові методи забезпечують стабільнішу від-

творюваність клінічних параметрів. Результати статистичного опрацювання експериментальних даних [4, р. 7–9; 7, р. 1520–1523; 8, р. 201–203] засвідчують значно нижчу варіабельність показників прилягання у цифрових реставрацій (SD < 15 мкм), що підтверджує високу повторюваність та стабільність CAD/CAM-виробничого процесу. CAD/CAM-коронки у більшості випадків характеризуються меншою крайовою щільною, ніж конструкції, виготовлені традиційним способом [1, р. 1715–1716]. З'ясовано, що цифрові технології сприяють рівномірнішому розподілу внутрішніх щілин, що знижує ризик виникнення вторинного карієсу та цементної деградації. Кількісний аналіз [1, р. 1715–1716; 9, р. 5–7; 10, р. 202–203; 11] продемонстрував, що внутрішня щільність у CAD/CAM-коронках має однорідніший профіль на всій площі препарованого зуба, що позитивно впливає на рівномірність цементного шару та його адгезивні властивості.

Подальший розвиток цієї теми простежується в роботах останніх років. П. Ганге, К. С. Пісулкар, А. Бері та П. Дас (P. Gangde, K. S. Pisulkar, A. Beri, P. Das) [8, р. 201–205] дослідили вплив алгоритмів штучного інтелекту на процес CAD/CAM-проекування цирконієвих коронок і дійшли висновку, що такі підходи забезпечують кращу крайову та внутрішню адаптацію порівняно з традиційними CAD/CAM-системами без ШІ-підтримки. Аналогічні результати опубліковано в [4, р. 6–9], де автори продемонстрували, що тип цифрового сканування суттєво впливає на точність прилягання, причому інтраоральні сканери забезпечують найстабільніші результати. Експериментально встановлено, що застосування інтраоральних сканерів дає змогу зменшити крайові відхилення в середньому на 15–25 %, порівняно з модельними сканерами, що підтверджується результатами дисперсійного аналізу (ANOVA) [4, р. 6–9; 7, р. 1519–1522]. Дослідники відзначили вплив матеріалу та технології обробки на механічні властивості й точність коронок.

І. Рексепі та співавтори (I. Rexhepi et al.) [12, р. 6–10; 13, р. 5–9] встановили, що діоксид цирконію, літій-дисилікат та гібридні CAD/CAM-реставрації виявляють високу міцність й однорідну структуру, проте показники залежать від параметрів фрезерування, адитивного виготовлення та термічної обробки. Літій-дисилікатні коронки, виготовлені за CAD/CAM-технологією, мають вищу тріщиностійкість і точнішу адаптацію, ніж аналоги, створені за традиційними методами [9, р. 4–7]. Подібні

результати отримано А. О. Балладарес та співавторами (A. O. Balladares et al.) [13, р. 7–10], які вивчили вплив термічної обробки на міцність CAD/CAM-керамік і продемонстрували їхню високу структурну стабільність. За результатами випробувань на згин і стиск встановлено, що середні показники міцності CAD/CAM-коронок із літій-дисилікату перевищують 350–400 МПа, забезпечуючи їхню високу стійкість до функціональних жувальних навантажень [9, р. 6–8; 12, р. 7–9; 14, р. 355–357].

Точність цифрового моделювання варіює залежно від обраного матеріалу та програмного забезпечення CAD/CAM, що підкреслює необхідність ретельного підбору технології для конкретної клінічної ситуації [15, р. 3–6]. За даними М. Ревілья-Леона, М. Дж. Мейєра, А. Зандінеджа та М. Озкана (M. Revilla-Leon, M. J. Meyer, A. Zandinejad, M. Ozcan) [3, р. 30–34], це позитивно впливає на механічну стабільність коронок та їхню поведінку під функціональним навантаженням. CAD/CAM-матеріали демонструють прогнозовані показники міцності та зношування, що робить їх придатними для довготривалого клінічного застосування [12, р. 6–10].

Вагомою перевагою цифрових технологій є оптимізація клінічного робочого процесу. Зокрема, CAD/CAM дає змогу суттєво скоротити час виготовлення коронок і відповідно зменшити кількість візитів пацієнта завдяки безпосередньому виготовленню біля крісла пацієнта [1, р. 1714–1716]. Мельник Н., С. Чертов, Р. Джафаров, Ю. Караван та О. Беліков (N. Melnyk, S. Chertov, R. Jafarov, Y. Karavan, O. Belikov) [16, р. 60–64] підтверджують, що це особливо актуально в концепції мінімально інвазивних реставрацій, де швидкість і точність безпосередньо впливають на клінічний результат. Крім того, клінічні спостереження засвідчують скорочення загальної тривалості лікування на 30–50 % порівняно з класичним лабораторним протоколом виготовлення коронок [1, р. 1714–1716; 16, р. 61–64].

Метою дослідження є комплексне порівняння ефективності CAD/CAM-технологій і традиційних методів виготовлення коронок з урахуванням основних клінічно значущих параметрів, зокрема точності прилягання, механічних властивостей матеріалів, клінічної ефективності та довговічності ортопедичних реставрацій.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких **завдань**:

1. дослідити вплив вибору матеріалу та технології його обробки на механічні властивості й довговічність ортопедичних реставрацій;

2. проаналізувати технологічні параметри виготовлення коронок за допомогою CAD/CAM-технологій та традиційних методів;

3. оцінити ефективність клінічного робочого процесу за використання цифрових протоколів, зокрема можливості chairside-виготовлення та зменшення кількості візитів пацієнта;

4. здійснити порівняльний аналіз CAD/CAM і традиційних методів із позицій клінічної ефективності та тривалості клінічної експлуатації коронок.

Методи дослідження. Методологічну основу дослідження становило комплексне порівняльне оцінювання CAD/CAM-технологій і традиційних методів виготовлення коронок із позицій матеріалознавчих характеристик, особливостей виробничих процесів та клінічної ефективності. Такий підхід дав змогу розглядати кожну технологію не ізольовано, а як частину єдиного ланцюга «матеріал – технологія – клінічний результат».

На першому етапі виконано порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів, що застосовуються в CAD/CAM-виробництві (діоксид цирконію, літійдисилікат, гібридні кераміки), та матеріалів, характерних для традиційних технологій (металокераміка, пресована кераміка). Оцінювання зосереджувалося на показниках згинальної міцності, тріщиностійкості, мікроструктурної однорідності та здатності матеріалів протистояти циклічним жувальним навантаженням. Саме ці параметри визначають надійність і довговічність ортопедичних реставрацій.

Другий етап дослідження присвячено аналізу технологічних параметрів виготовлення коронок. В межах CAD/CAM-підходів розглядалися особливості інтраорального сканування, комп'ютерного моделювання, процесів фрезерування та подальшої термічної обробки. Для традиційних методів увагу зосереджено на етапах отримання відбитків, ручного моделювання каркасів, лиття або пресування та облицювання. Аналізувалися чинники, що спричиняють виникнення технологічних похибок і зумовлюють варіабельність кінцевих результатів.

На завершальному етапі здійснювалася інтерпретація клінічних результатів з урахуванням отриманих матеріалознавчих і технологічних даних. Це дало змогу оцінити практичну ефективність різних виробничих стратегій та простежити взаємозв'язок між властивостями матеріалу, особливостями технологічного процесу й прогнозованістю клінічного результату.

Результати дослідження та їх обговорення. У сучасній стоматології міцність, довговічність

та механічні характеристики ортопедичних реставрацій насамперед залежать від вибору матеріалу та методу його оброблення. З огляду на це, порівняння цифрових CAD/CAM-технологій із традиційними методами виготовлення коронок є актуальним, оскільки ці підходи створюють різні умови для реалізації властивостей матеріалів [3, р. 30–32; 12, р. 6–8].

Матеріали, що використовуються в CAD/CAM-виробництві, – діоксид цирконію, літійдисилікат і гібридні кераміки – вирізняються високою передбачуваністю фізико-механічних характеристик (табл. 1). Це забезпечується промисловою стандартизацією заготовок і контрольованими умовами обробки, що мінімізує внутрішні дефекти та підвищує надійність реставрацій. Діоксид цирконію відзначається високою згинальною міцністю ($\approx 900\text{--}1200$ МПа), значною тріщиностійкістю та однорідною мікроструктурою, що гарантує стабільність навіть за багаторазових циклічних навантажень. Літійдисилікат поєднує середньо-високу міцність ($\approx 360\text{--}500$ МПа) із високою тріщиностійкістю і дрібнокристалічною структурою, що робить його придатним для випадків із помірним жувальним навантаженням. Гібридні кераміки демонструють середню міцність ($\approx 150\text{--}250$ МПа) і помірну стійкість до циклічних навантажень завдяки матричній структурі, яка частково поглинає жувальні сили.

У традиційних технологіях, зокрема металокераміці та пресованій кераміці, фізико-механічні властивості значно варіюють. Металокерамічні реставрації мають високу міцність завдяки металевому каркасу, проте тріщиностійкість облицювального шару часто є нижчою через різницю коефіцієнтів термічного розширення та накопичення внутрішніх напружень. Мікроструктурна однорідність таких конструкцій зазвичай нижча, а стійкість до циклічних навантажень – середня. Пресована кераміка характеризується середньою міцністю ($\approx 300\text{--}400$ МПа) і тріщиностійкістю, однак її механічні властивості значною мірою залежать від точності пресування та досвіду зубного техника.

Згинальна міцність як показник опору жувальному навантаженню суттєво переважає у CAD/CAM-матеріалів завдяки стандартизованому виробничому процесу та мінімальним внутрішнім дефектам. Однорідна структура й контрольоване спікання дають змогу цифровим матеріалам ефективно протистояти утворенню та поширенню мікротріщин, тоді як у традиційних керамічних конструкціях цей показник значною

мірою залежить від точності ручної роботи та властивостей окремих шарів.

Мікроструктурна однорідність безпосередньо впливає на передбачуваність механічних властивостей і довговічність реставрацій. Заготовки для CAD/CAM виготовляються промисловим способом, що забезпечує мінімальну пористість і залишкові напруження, тоді як у традиційних технологіях неоднорідності можуть виникати на будь-якому етапі виробництва, підвищуючи ризик локальних руйнувань.

Завдяки однорідності матеріалу та високій точності обробки CAD/CAM-реставрації демонструють рівномірний розподіл напружень і стабільну довгострокову експлуатаційну надійність, тоді як традиційні методи часто формують локальні зони підвищеного навантаження, що збільшує ймовірність втомного руйнування.

Вибір матеріалу та технології його обробки є визначальним чинником, що формує механічні властивості й довговічність ортопедичних реставрацій. Як свідчать дані в табл. 1, CAD/CAM-технології забезпечують стабільніші та прогнозованіші механічні показники завдяки стандартизованим умовам виробництва й високій якості матеріалів, що зумовлює передбачуваність клінічних результатів. Водночас традиційні методи виготовлення коронок зберігають практичну значущість, особливо у випадках складних індивідуальних конструкцій, проте потребують ретельного контролю технологічних етапів для досягнення належного рівня механічної надійності та тривалості функціонування реставрацій.

Необхідну складову порівняльного дослідження CAD/CAM-технологій і традиційних методів становить аналіз технологічних параметрів виготовлення ортопедичних коронок, оскільки саме виробничий процес значною мірою визначає точність, механічну надійність та довго-

тривалу клінічну ефективність реставрацій. Відмінності між цифровими й класичними підходами виявляються не лише в наборі технологічних етапів, а й у ступені їх контролю, стандартизації та відтворюваності результатів.

CAD/CAM-підходи ґрунтуються на повністю цифровому робочому протоколі, що поєднує етапи сканування, комп'ютерного проектування, автоматизованого виготовлення та фінальної термічної обробки. Початковим кроком є цифрове сканування, яке забезпечує формування тривимірної моделі препарованого зуба та прилеглих анатомічних структур. Якість отриманих цифрових даних має принципове значення, оскільки будь-які неточності на цьому етапі безпосередньо впливають на подальше моделювання коронки. У межах CAD-етапу здійснюється комп'ютерне проектування реставрації з урахуванням анатомічної форми, оклюзійних взаємодій та функціональних навантажень, що дає змогу заздалегідь оптимізувати геометрію конструкції та мінімізувати ризик локальних перенапружень [1, р. 1713–1716].

Наступний етап (CAM-виробництво) передбачає фрезерування коронок із промислово виготовлених заготовок, що характеризуються стабільною мікроструктурою та передбачуваними фізико-механічними властивостями. Завершальною стадією є термічна обробка, зокрема спікання або кристалізація, у процесі якої матеріал набуває остаточних експлуатаційних характеристик. Сукупність стандартизованих цифрових процедур забезпечує високу відтворюваність результатів і зменшує вплив людського фактора на якість готової реставрації. Натомість традиційні методи виготовлення коронок, зокрема металокераміка та пресована кераміка, ґрунтуються на поетапному клініко-лабораторному процесі, що значною мірою залежить від ручної праці. Виготовлення

Таблиця 1

Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів для виготовлення коронок

Матеріал	Згинальна міцність (МПа)	Тріщино-стійкість	Мікроструктурна однорідність	Стійкість до циклічних навантажень	Джерело
Діоксид цирконію (CAD/CAM)	900-1200	Висока	Висока	Високий	[3, р. 30-34; 12, р. 6-10; 17, р. 340-345]
Літій-дисилікат (CAD/CAM)	360-500	Висока	Середньо-висока	Середній -високий	[9, р. 4-7; 10, р. 201-203; 12, р. 7-11]
Гібридні кераміки (CAD/CAM)	150-250	Середня	Середня	Середній	[11, р. 1626-1629; 12, р. 8-12;]
Металокераміка (традиційна)	>400	Середня	Середня -низька	Середній	[1, р. 1714-1716; 2, р. 78-80]
Пресована кераміка (традиційна)	300-400	Середня	Середня	Середній	[1, р. 1715-1716; 12, р. 9-11]

реставрації починається з отримання фізичного відбитка, точність якого визначається як властивостями відбиткового матеріалу, так і технікою його застосування. Подальше створення гіпсової моделі є основою для ручного моделювання каркаса, після чого виконуються процеси лиття металу або пресування кераміки та пошарового облицювання. Кожен із зазначених етапів потенційно підвищує ризик виникнення технологічних неточностей і мікродефектів, що може спричинити нерівномірний розподіл функціональних навантажень. У клінічному аспекті це часто виявляється сколами керамічного облицювання, появою тріщин або поступовим зниженням механічної стабільності конструкцій, що обмежує тривалість їхнього клінічного використання [3, р. 30–32].

Отримані результати добре узгоджуються з сучасними дослідженнями [18, с. 108–110], які стверджують, що використання комп'ютерного планування та шаблон-керованих методик дозволяє скоротити кількість клінічних етапів, забезпечити точність позиціонування конструкцій майже до рівня «субміліметра» й зменшити час лікування приблизно на 20–30 %, у порівнянні з традиційними підходами. Крім того, цифрові протоколи роблять результати більш передбачуваними й відтворюваними, знижують вплив людського фактора на якість реставрацій та покращують взаємодію між клінічним і лабораторним етапами. У підсумку це означає більш прогнозоване лікування та вищу довіру до результату як зі сторони лікаря, так і пацієнта [18, с. 111–114].

Для CAD/CAM-технологій основними джерелами похибок є якість цифрового сканування, алгоритми програмного забезпечення та технічні параметри фрезерного обладнання. Водночас

у традиційних методах визначальну роль відіграє людський фактор, а також фізико-хімічні процеси, пов'язані з усадкою матеріалів, термічними деформаціями та багатоступеневістю виробництва. Саме ці особливості пояснюють більшу розбіжність показників точності та відтворюваності за застосування традиційних технологій порівняно з цифровими протоколами [12, р. 5–9].

Оцінювання ефективності клінічного робочого процесу за використання цифрових протоколів у стоматології засвідчує їхню перевагу над традиційними методами (табл. 2).

Технології CAD/CAM інтегрують основні етапи (інтраоральне сканування, комп'ютерне моделювання та виготовлення коронок) в єдиний цифровий ланцюг. Це дає змогу уникнути зайвих проміжних операцій і значно зменшує залежність від ручної праці зубного техника, що відповідає сучасним тенденціям автоматизації та стандартизації клінічних процесів [1, р. 1714–1716].

Вагомою складовою клінічної ефективності цифрових протоколів є також оптимізація організації лікувального процесу. Протокол прикрісельного виготовлення коронок (chairside) передбачає завершення ортопедичного лікування за один клінічний сеанс, що усуває потребу в повторних відвідуваннях та тимчасових реставраціях. Такий підхід підвищує комфорт пацієнтів і зменшує навантаження на зуботехнічні лабораторії. Традиційні методи, навпаки, потребують кількох відвідувань і значних часових витрат на виконання лабораторних етапів, що може негативно впливати на загальну ефективність клінічного процесу [16, р. 60–64].

Цифрові протоколи забезпечують передбачувану точність прилягання реставрацій навіть за

Таблиця 2

Порівняння ефективності клінічного робочого процесу при використанні традиційних і цифрових протоколів під час виготовлення коронок

Показник	Традиційні методи	CAD/CAM-протоколи (chairside)	Джерело
Кількість візитів пацієнта	Зазвичай 2-3, через необхідність відбитків, моделювання та підгонки	Лише 1 візит: весь процес від сканування до готової коронки проходить за один сеанс	[16, р. 60-64]
Час лікування	7-10 днів, включно з лабораторними етапами	60-90 хвилин завдяки швидкому цифровому виробництву	[16, р. 60-64]
Проміжні етапи	Багато проміжних кроків: відбитки, гіпсові моделі, примірки	Мінімум проміжних дій: цифровий ланцюг скорочує ручну роботу	[1, р. 1714-1716]
Ризик неточності	Помірний або високий, залежить від майстерності техника та точності відбитків	Низький завдяки цифровому моделюванню, фрезеруванню і контролю параметрів	[16, р. 60-64]
Комфорт пацієнта	Середній: повторні візити і проміжні примірки можуть створювати дискомфорт	Високий: пацієнт отримує готову коронку за один прийом	[16, р. 60-64]
Оптимізація клінічного часу	Обмежена: багато ручної роботи та очікування лабораторних етапів	Висока: інтеграція цифрового процесу дозволяє економити час і ресурси	[1, р. 1714-1716]

одноетапного виготовлення, що підтверджує їхню відповідність принципам доказової медицини. Менша кількість візитів знижує ризики, пов'язані з тривалим використанням тимчасових коронок або неточністю передачі відбитків у лабораторію. Для лікаря це раціональніший розподіл робочого часу, зменшення навантаження на лабораторію та ефективніша логістика лікування.

Отже, цифрові протоколи та технології прикрісельного виготовлення не лише підвищують точність і передбачуваність результатів, а й відповідають основним критеріям сучасної ортопедичної стоматології: ефективності, стандартизації та орієнтації на пацієнта. Вони є не просто інструментом підвищення комфорту, а й стратегічним чинником раціонального використання часу та ресурсів клініки, що підтверджує їхню роль у розвитку галузі. Графічна залежність (рис. 1) ілюструє порівняння CAD/CAM-технологій і традиційних методів виготовлення коронок з погляду клінічної ефективності та тривалості їх експлуатації.

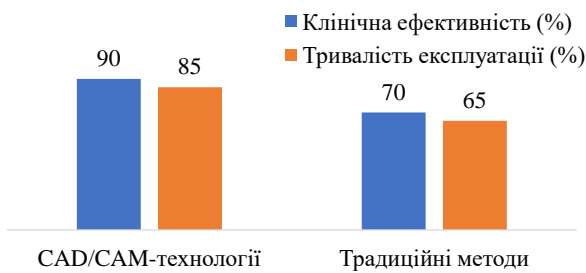


Рис. 1. Порівняння CAD/CAM-технологій і традиційних методів виготовлення коронок за клінічною ефективністю та тривалістю експлуатації. Джерело: теоретичні дані отримані на основі аналізу [1, р. 1714-1716; 16, р. 60-64]

Отже, результати засвідчують, що CAD/CAM-технології забезпечують вищу клінічну ефективність і тривалішу експлуатаційну стабільність коронок завдяки точності виготовлення, однорідності матеріалів і стандартизованим умовам виробництва. Водночас традиційні методи, зберігаючи актуальність у певних клінічних ситуаціях, характеризуються більшою варіабельністю результатів і потребують посиленого контролю на всіх етапах виготовлення для досягнення належного рівня функціональної надійності та довговічності ортопедичних реставрацій.

Ще однією перевагою цифрових технологій є можливість оптимізації дизайну на етапі моделювання. CAD-системи забезпечують урахування оклюзійних взаємовідношень, функціональних особливостей зубного ряду та індивідуальної анатомії

пацієнта. Це підвищує надійність коронок і зменшує ризик їх передчасного зношування. У традиційних підходах подібні корекції виконуються пізніше й не завжди відтворюються однаково.

Проте переваги CAD/CAM значною мірою залежать від досвіду оператора, якості цифрового відбитка та правильного вибору матеріалів і програмного забезпечення [2, р. 81–83; 19, р. 52–54]. Водночас традиційні методи залишаються необхідними для виготовлення складних індивідуальних реставрацій або за обмеженого доступу до цифрового обладнання [5, р. 444–446; 17, р. 343–345].

З огляду на наведене, CAD/CAM-технології в більшості клінічних сценаріїв перевершують традиційні методи за показниками точності, повторюваності та механічної надійності. Водночас максимальна ефективність цифрових рішень досягається лише за умови їхнього раціонального використання в поєднанні з клінічним досвідом лікаря та індивідуальним підходом до пацієнта [10, р. 202–204; 12, р. 12–14].

Загалом вибір технології має ґрунтуватися на індивідуалізованому підході, що враховує клінічні показання, механічні та естетичні вимоги до матеріалу, а також технічний потенціал клініки й лабораторії. Раціональне поєднання цифрових і традиційних методів у межах одного лікувального процесу дає змогу досягти балансу між точністю, довговічністю реставрацій та економічною доцільністю.

Висновки. На основі узагальнення отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо вибору оптимальної технології виготовлення коронок з урахуванням клінічних умов, властивостей матеріалів та технічних можливостей клініки.

За умов високого жувального навантаження – зокрема при протезуванні молярів, лікуванні пацієнтів із бруксизмом або зниженою висотою прикусу – рекомендовано застосовувати CAD/CAM-технології з діоксидом цирконію. Цей матеріал вирізняється високою міцністю на згин, стійкістю до тріщин і однорідною мікроструктурою, що забезпечує рівномірний розподіл навантажень і довговічність реставрацій навіть за інтенсивної експлуатації.

За підвищених естетичних вимог і помірного навантаження, характерних для фронтальної групи зубів і премолярів, доцільним є використання CAD/CAM-коронок із літій-дисилікату. Цей матеріал поєднує достатню механічну міцність із високими оптичними характеристиками,

а цифрове моделювання дає змогу точно відтворити анатомічну форму та оклюзійні контакти.

Для клінік із повним цифровим оснащенням оптимальним є впровадження прикрісельних протоколів CAD/CAM. Вони є особливо ефективними у стандартних ортопедичних випадках без складних оклюзійних порушень, оскільки дають змогу завершити лікування за один візит, підвищити комфорт пацієнта та уникнути ризиків, пов'язаних із тимчасовими реставраціями.

Традиційні методи залишаються актуальними за обмежених технологічних можливостей або потреби у складному індивідуальному нашаруванні кераміки для досягнення високих естетичних показників. У таких випадках необхідним є посилений контроль якості на кожному етапі – від отримання відбитка до облицювання, – що дає змогу мінімізувати похибки та забезпечити передбачуваний результат.

Отже, отримані результати підтверджують: CAD/CAM-технології мають бути пріоритетним вибором у більшості стандартних клінічних ситуацій, тоді як традиційні методи залишаються виправданою альтернативою для специфічних випадків, що потребують індивідуалізованого підходу та розширених естетичних можливостей.

Література:

1. Alshawi A. A., Alasim A. A., Alfaisal O. A. Comparative effectiveness of CAD/CAM versus conventional fabrication methods for dental crowns: Systematic review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023. Vol. 19, no. 2. P. 1712–1717. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1703> (date of access: 15.02.2026).
2. Alghazzawi T. F. Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *Journal of Prosthodontic Research*. 2016. Vol. 60, no. 2. P. 72–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.01.003> (date of access: 15.02.2026).
3. Revilla-León M., Meyer M. J., Zandinejad A., Özcan M. Additive manufacturing technologies for processing zirconia in dental applications. *International Journal of Computerized Dentistry*. 2020. Vol. 23, no. 1. P. 27–37. PMID: 32207459
4. Akat B., Senturk A., Ocak M., Kilicarslan M. A., Orhan K., Onder M., Gonuldas F. Quantitative evaluation of marginal and internal fit of CAD/CAM ceramic crown restorations obtained by model scanner, intraoral scanner, and different CBCT scans. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 14. Art. 8017. URL: <https://doi.org/10.3390/app15148017> (date of access: 15.02.2026).
5. Marginal and internal fit of feldspathic ceramic CAD/CAM crowns fabricated via different extraoral digitization methods: a micro-computed tomography

analysis / E. İ. Oğuz et al. *Odontology*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s10266-020-00560-6> (date of access: 15.02.2026).

6. Taha A. I., Saad A. E. Clinical and radiographic outcomes of endocrowns fabricated from two different CAD-CAM materials versus stainless steel crowns in restoring first permanent molars in children: a randomized clinical trial. *BMC Oral Health*. 2025. Vol. 25, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06507-z> (date of access: 15.02.2026).

7. Abo E. R., Nasr D. Non-invasive digital technique for examination of marginal and internal adaptation of different ceramic table-tops. *Egyptian Dental Journal*. 2024. Vol. 70, no. 2. P. 1515–1528. URL: <https://doi.org/10.21608/edj.2024.257473.2843> (date of access: 15.02.2026).

8. Comparative evaluation of marginal and internal fit of zirconia crowns designed using artificial intelligence and CAD-CAM software: A systematic review / P. GANGDE et al. *International Arab Journal of Dentistry*. 2025. Vol. 16, no. 1. P. 197–207. URL: <https://doi.org/10.70174/iajd.v16i1.1407> (date of access: 15.02.2026).

9. Fayed A. K., Azer A. S., AboElhassan R. G. Fit accuracy and fracture resistance evaluation of advanced lithium disilicate crowns (in- vitro study). *BMC Oral Health*. 2025. Vol. 25, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05325-z> (date of access: 15.02.2026).

10. Kojima K., Nagaoka K., Murata Y., Yamamoto K., Akiyama S., Hokii Y., Fusejima F. Marginal adaptation of CAD/CAM milled lithium disilicate glass ceramic crowns. *Journal of Osseointegration*. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 201–204. URL: <https://doi.org/10.23805/JO.2022.14.04.1> (date of access: 15.02.2026).

11. In vitro comparison of marginal fit between CAD/CAM hybrid ceramic crowns and prefabricated zirconia crowns for primary molars / N. R. Salman et al. *Odontology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s10266-025-01089-2> (date of access: 15.02.2026).

12. Clinical Applications and Mechanical Properties of CAD-CAM Materials in Restorative and Prosthetic Dentistry: A Systematic Review / I. Rexhepi et al. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Vol. 14, no. 8. P. 431. URL: <https://doi.org/10.3390/jfb14080431> (date of access: 15.02.2026).

13. Comparative Study of the Influence of Heat Treatment on Fracture Resistance of Different Ceramic Materials Used for CAD/CAM Systems / A. O. Balladares et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 1246. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17061246> (date of access: 15.02.2026).

14. Comparative Analysis of Endocrown Fracture Resistance and Marginal Adaptation: CAD/CAM Technology using Lithium Disilicate vs. Zirconia-Reinforced Lithium Silicate Ceramics / E. Jalalian et al. *The Saudi Dental Journal*. 2024. Vol. 36, no. 2. P. 353–358. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.11.020> (date of access: 15.02.2026).

15. Accuracy analysis of all-ceramic crowns with different materials in CAD/CAM digital replication mode / H. Wang et al. *BMC Oral Health*. 2025. Vol. 25, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05892-9> (date of access: 15.02.2026).

16. The use of CAD/CAM technologies in minimally invasive dental restorations: a systematic review / N. Melnyk et al. *Romanian Journal of Oral Rehabilitation*. 2025. Vol. 17, no. 1. P. 56–72. URL: <https://doi.org/10.62610/rjor.2025.1.17.6> (date of access: 15.02.2026).

17. Marginal fit of 3-unit CAD–CAM zirconia frameworks fabricated using cone beam computed tomography scans: an experimental study / H. B. Belgin et al. *Odontology*. 2021. Vol. 110, no. 2. P. 339–348. URL: <https://doi.org/10.1007/s10266-021-00668-3> (date of access: 15.02.2026).

18. Халецька В., Комариця О. Сучасні технології та методи встановлення зубних імплантів. *Сучасна медицина, фармація та психологічне здоров'я*. 2023. Вип. 5, № 14. С. 108–114. DOI: <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2023-5-18> (дата звернення: 22.02.2026).

19. Applications of CAD/CAM technology in dentistry / R. E. Ghiță et al. *Romanian Journal of Dental Research*. 2024. Vol. 1, no. 1. P. 47–56. URL: <https://doi.org/10.58179/rjdr1105> (date of access: 15.02.2026).

References:

1. Alshawi, A. A., Alasim, A. A., & Alfaisal, O. A. (2023). Comparative effectiveness of CAD/CAM versus conventional fabrication methods for dental crowns: Systematic review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(2), 1712–1717. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1703>

2. Alghazzawi, T. F. (2016). Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *Journal of Prosthodontic Research*, 60(2), 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.01.003>

3. Revilla-León, M., Meyer, M. J., Zandinejad, A., & Özcan, M. (2020). Additive manufacturing technologies for processing zirconia in dental applications. *International Journal of Computerized Dentistry*, 23(1), 27–37.

4. Akat, B., Senturk, A., Ocak, M., Kilicarlan, M. A., Orhan, K., Onder, M., & Gonuldas, F. (2025). Quantitative evaluation of marginal and internal fit of CAD/CAM ceramic crown restorations obtained by model scanner, intraoral scanner, and different CBCT scans. *Applied Sciences*, 15(14), Article 8017. <https://doi.org/10.3390/app15148017>

5. Oguz, E. I., Kılıçarslan, M. A., Ocak, M., Bilecenoglu, B., & Ekici, Z. (2021). Marginal and internal fit of feldspathic ceramic CAD/CAM crowns fabricated via different extraoral digitization methods: A micro-computed tomography analysis. *Odontology*, 109(2), 440–447. <https://doi.org/10.1007/s10266-020-00560-6>

6. Taha, A. I., & Saad, A. E. (2025). Clinical and radiographic outcomes of endocrowns fabricated from two different CAD-CAM materials versus stainless steel crowns in restoring first permanent molars in children: A randomized clinical trial. *BMC Oral Health*, 25, Article 1127. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06507-z>

7. Abo, E. R., & Nasr, D. (2024). Non-invasive digital technique for examination of marginal and internal adaptation of different ceramic table-tops. *Egyptian Dental Journal*, 70(2), 1515–1528. <https://doi.org/10.21608/edj.2024.257473.2843>

8. Gangde, P., Pisulkar, K. S., Beri, A., & Das, P. (2025). Comparative evaluation of marginal and internal fit of zirconia crowns designed using artificial intelligence and CAD-CAM software: A systematic review. *International Arab Journal of Dentistry*, 16(1), 197–207. <https://doi.org/10.70174/iajd.v16i1.1407>

9. Fayed, A. K., Azer, A. S., & Abo, E. R. G. (2025). Fit accuracy and fracture resistance evaluation of advanced lithium disilicate crowns (in-vitro study). *BMC Oral Health*, 25, Article 58. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05325-z>

10. Kojima, K., Nagaoka, K., Murata, Y., Yamamoto, K., Akiyama, S., Hokii, Y., & Fusejima, F. (2022). Marginal adaptation of CAD/CAM milled lithium disilicate glass ceramic crowns. *Journal of Osseointegration*, 14(4), 201–204. <https://doi.org/10.23805/JO.2022.14.04.1>

11. Salman, N. R., Khattab, N. M., Gomaa, Y., & Elheeny, A. A. H. (2025). In vitro comparison of marginal fit between CAD/CAM hybrid ceramic crowns and prefabricated zirconia crowns for primary molars. *Odontology*, 113, 1624–1633. <https://doi.org/10.1007/s10266-025-01089-2>

12. Rexhepi, I., Santilli, M., D'Addazio, G., Tafuri, G., Manciocchi, E., Caputi, S., & Sinjari, B. (2023). Clinical applications and mechanical properties of CAD-CAM materials in restorative and prosthetic dentistry: A systematic review. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(8), Article 431. <https://doi.org/10.3390/jfb14080431>

13. Balladares, A. O., Abad-Coronel, C., Ramos, J. C., Fajardo, J. I., Paltan, C. A., & Biedma, B. J. (2024). Comparative study of the influence of heat treatment on fracture resistance of different ceramic materials used for CAD/CAM systems. *Materials*, 17(6), Article 1246. <https://doi.org/10.3390/ma17061246>

14. Jalalian, E., Zarbakhsh, A., Khorshidi, S., Ghalipour, S., Mohammadnasl, S., & Sayyari, M. (2024). Comparative analysis of endocrown fracture resistance and marginal adaptation: CAD/CAM technology using lithium disilicate vs. zirconia-reinforced lithium silicate ceramics. *Saudi Dental Journal*, 36(2), 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.11.020>

15. Wang, H., Qu, W., Wang, T., Wu, X., & Sun, H. (2025). Accuracy analysis of all-ceramic crowns with different materials in CAD/CAM digital replication

mode. *BMC Oral Health*, 25, Article 491. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05892-9>

16. Melnyk, N., Chertov, S., Jafarov, R., Karavan, Y., & Belikov, O. (2025). The use of CAD/CAM technologies in minimally invasive dental restorations: A systematic review. *Romanian Journal of Oral Rehabilitation*, 17(1), 56–72. <https://doi.org/10.62610/rjor.2025.1.17.6>

17. Belgin, H. B., Kale, E., Özçelik, T. B., & Yilmaz, B. (2022). Marginal fit of 3-unit CAD-CAM zirconia frameworks fabricated using cone beam computed tomography scans: An experimental study. *Odontology*, 110(2), 339–348. <https://doi.org/10.1007/s10266-021-00668-3>

18. Khaletska, V., & Komarytsia, O. (2023). Suchasni tekhnolohii ta metody vstanovlennia zubnykh implantiv [Modern technologies and methods of dental implant placement]. *Suchasna medytsyna, farmatsiia ta*

psykholohichne zdorovia – Modern Medicine, Pharmacy and Psychological Health, 5(14), 108–114. Retrieved from <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2023-5-18> [in Ukrainian].

19. Ghița, R. E., Stanciu, A., Popescu, S. M., Khaddour, A. S., Mercuț, V., Scriciu, M., Iacov-Craițoiu, M. M., Draghici, E. C., & Cojocaru, M. O. (2024). Applications of CAD/CAM technology in dentistry. *Romanian Journal of Dental Research*, 1(1), 47–56. <https://doi.org/10.58179/RJDR1105>

Дата першого надходження рукопису
до видання: 29.03.2026

Дата прийнятого до друку рукопису
після рецензування: 19.04.2026

Дата публікації: 22.05.2026