



УДК 616.314-089-06-74-035.56:615.464

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-1394.2025-2.2>

А.О. Жмурко, аспірант, кафедра щелепно-лицевої хірургії та сучасних стоматологічних технологій, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, КНП «КМКЛ № 1», бульвар Тараса Шевченка, 13, м. Київ, Україна, індекс 01601, annetkazhmurko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4608-4893>

Р.С. Паливода, кандидат медичних наук, доцент, кафедра щелепно-лицевої хірургії та сучасних стоматологічних технологій, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, бульвар Тараса Шевченка, 13, м. Київ, Україна, індекс 01601, r.palyvoda@nmu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7489-7170>

ВИБІР КІСТКОВОЗАМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ У СТОМАТОЛОГІЇ ТА ЩЕЛЕПНО-ЛИЦЕВІЙ ХІРУРГІЇ: ЗА ДАНИМИ АНАЛІЗУ СУЧАСНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Вступ. Кісткові дефекти щелепно-лицевої ділянки залишаються актуальним питанням у практичній діяльності лікаря хірурга-стоматолога. Серед найбільш поширених причин локального дефіциту кісткової тканини вирізняють: травми альвеолярного паростку, захворювання пародонту, інфекційні процеси, пухлинні захворювання, вроджені вади розвитку тощо. Аутологічна кістка вважається «золотим стандартом» у усуненні кісткових дефектів, але її використання є обмеженим через значний ризик ускладнень та явище резорбції. Ало- та ксенотрансплантати не завжди позитивно сприймаються пацієнтами через їх походження, ризики відторгнення і низьку біодеградацію. Синтетичні матеріали, зокрема кальцій-фосфатні (Са-Р) кераміки, можуть сформувати нові перспективи в регенеративній медицині.

Метою дослідження є проведення систематичного аналізу сучасних кістковозамісних матеріалів та їх клінічну ефективність.

Матеріали і методи. Проведено аналіз сучасних літературних джерел за 1996–2025 рр. у базах NIH, PubMed, MEDLINE, Scopus, Web of Science, повнотекстових версій статей (з відкритим доступом), що присвячені властивостям кістковозамісних матеріалів у практиці лікаря-стоматолога.

Результати. Аутотрансплантати мають високу остеогенність, але супроводжуються ризиками резорбції та ускладнень у донорських ділянках. Алотрансплантати, хоч і забезпечують остеокондукцію, схильні до імунних реакцій, ризику інфекцій і високої вартості. Ксенотрансплантати з бичачої кістки мають добру біосумісність, проте не резорбуються, що може знижувати контакт з імплантатом. Кальцій-фосфатна кераміка (КФК) демонструє остеокондуктивність, біосумісність і потенціал для остеοіндукції, особливо завдяки пористій структурі та нанотопографії.

Висновки. Жоден матеріал не є універсальним, вибір лікаря залежить від багатьох факторів і часто не є очевидним. На наш погляд, перспективним є використання двофазної КФК (ДКФК), що комбінує в собі декілька ефектів одночасно для ефективної клінічної практики.

Ключові слова: кістковозамісні матеріали, германій, кальцій-фосфатна кераміка, регенерація, кістковий дефект.

A.O. Zhmurko, Postgraduate Student, Department of Maxillofacial Surgery and Innovative Dental Technologies, Institute of Postgraduate Education, Bogomolets National Medical University; Kyiv City Clinical Hospital № 1, Institute of Postgraduate Education, Bogomolets National Medical University, 13 Taras Shevchenko Boulevard, Kyiv, Ukraine, postal code 01601, annetkazhmurko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4608-4893>

R.S. Palyvoda, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of Maxillofacial Surgery and Innovative Dental Technologies, Institute of Postgraduate Education, Bogomolets National Medical University, 13 Taras Shevchenko Boulevard, Kyiv, Ukraine, postal code 01601, r.palyvoda@nmu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7489-7170>



CHOICE OF BONE SUBSTITUTE MATERIALS IN DENTISTRY AND MAXILLOFACIAL SURGERY: A LITERATURE REVIEW

Introduction. Bone defects in the maxillofacial region remain a relevant challenge in the practice of dental surgeons. Among the most common causes of local bone tissue deficiency are trauma, periodontal disease, infections, tumors, congenital anomalies, etc. Autologous bone is considered the “gold standard” in bone grafting, however, its use is limited due to the significant risk of complications and resorption. Allo- and xenografts are not always well accepted by patients due to their origin, risks of rejection, and low biodegradability. Synthetic materials, in particular calcium phosphate (Ca-P) ceramics, may provide new prospects in regenerative medicine.

The **aim** of the study was to conduct a systematic analysis of modern bone replacement materials and their clinical effectiveness in clinical practice.

Materials and Methods. An analysis of existing literature sources for 1996–2025 was conducted in the NIH, PubMed, Medline, Scopus, and Web of Science databases with open access to full-text versions of articles devoted to the properties of bone replacement materials.

Results. Autografts have high osteogenicity but are associated with risks of resorption and complications at donor sites. Allografts, although providing osteoconduction, are prone to immune reactions, risk of infection, and high cost. Xenografts from bovine bone have good biocompatibility but do not resorb, which may reduce contact with the implant. Calcium phosphate ceramics (CPC) demonstrate osteoconductivity, biocompatibility, and potential for osteoinduction, particularly due to their porous structure and nanotopography.

Conclusions. Autografts have high osteogenicity but are associated with risks of resorption and complications in donor sites. Allografts, although providing osteoconduction, are prone to immune reactions, risk of infection, and high cost. Xenografts from bovine bone have good biocompatibility but do not resorb, which may reduce contact with the implant. Calcium phosphate ceramics (CPC) demonstrate osteoconductivity, biocompatibility, and potential for osteoinduction, particularly due to their porous structure and nanotopography.

Key words: bone substitute materials, autograft, calcium phosphate ceramics, regeneration, bone defect.

Вступ. Кісткові дефекти щелепно-лицевої ділянки є актуальним питанням у стоматології та щелепно-лицевій хірургії. Останніми роками потреба в кісткових трансплантатах і замінниках зросла через поширеність методу дентальної імплантації та необхідність відновлення дефектів, що виникають унаслідок травм, пародонтальних захворювань, травматичних оперативних втручань, інфекцій або вроджених вад, кіст і пухлин [1].

У випадках значних дефектів лицевого черепа, в тому числі верхньої та нижньої щелеп, застосовують аутологічну кісткову трансплантацію, яка вважається «золотим стандартом» завдяки сумісності тканин, остеогенним, остеокондуктивним і остеоіндуктивним властивостям [2]. Однак цей метод обмежений доступністю донорських ділянок, ризиком резорбції, локальними ускладненнями в ділянці забору, можливим невропатіям, інфекціями, відторгненням і сумнівною життєздатністю трансплантата [3].

Алогенним трансплантатам пацієнти часто не довіряють через їх походження та спосіб

виготовлення. До того ж ало- та ксенотрансплантати характеризуються низькою біодеградацією, ризиком передачі інфекцій, імунним відторгненням, високою вартістю та обмеженими остеогенними властивостями [4; 5; 6].

Сучасний розвиток нанотехнологій сприяв створенню органічних сполук мікроелементів, які активно досліджуються для застосування в медицині.

Мета дослідження – проаналізувати сучасні кістковозамісні матеріали, їх властивості, біосумісність і ефективність у стоматології на основі систематичного огляду літератури.

Матеріали і методи. У роботі проведено наративний огляд наукових публікацій, присвячених використанню кістковозамісних матеріалів у стоматології та щелепно-лицевій хірургії. Інформаційний пошук здійснювали в базах даних NIH, PubMed, Medline, Scopus, Web of Science. Для пошуку використовували ключові слова: «bone graft», «bone substitute», «dental surgery», «maxillofacial surgery», «bone regeneration».



До аналізу включали аналітичні огляди, клінічні дослідження та експериментальні роботи, опубліковані в період з 1996 по 2025 рр. Основну увагу приділяли публікаціям, які містили дані про властивості матеріалів, їхню остеоіндуктивність, остеокондуктивність, біосумісність, а також клінічну ефективність і можливі обмеження до застосування.

Результати. Аналіз літературних джерел показав, що для заміщення кісткових дефектів у стоматології застосовуються різноманітні групи кістковозамісних матеріалів [7; 8].

Аутогенні трансплантати. Аутоотрансплантати є «золотим стандартом» для кісткової пластики в медицині та стоматології, оскільки вони біосумісні, нетоксичні, остеогенні, остеоіндуктивні та остеокондуктивні [9; 10].

Вважається, що мезенхімальні стовбурові клітини (МСК) у кістковому мозку виживають після ішемії під час трансплантації, яка викликає зміни напруження кисню, рН і цитокінового середовища. Проте кілька досліджень продемонстрували, що більшість ендогенних клітин (ймовірно, остеоцитів, остеобластів і МСК) на аутогенній кістці або всередині неї зазнають апоптозу або некрозу під час кісткової пластики. Гістологічне дослідження після аугментації верхньощелепної пазухи у людей з використанням частинок аутогенної кістки склепіння черепа або гребеня клубової кістки показало, що частка нежиттєвої кістки становила 20–25% після 5 місяців післяопераційного періоду [11]. Небагато зрілих остеобластів виживають після трансплантації, але достатня кількість клітин-попередників, з яких походить остеогенний потенціал, виживає.

Аутологічна кістка є найбільш швидко васкуляризованою і, отже, найбільш остеогенною з усіх доступних натепер матеріалів [12].

Аутоотрансплантати отримують від того самого пацієнта та зазвичай з інтраоральних та екстраоральних ділянок, таких як нижньощелепний симфіз, нижньощелепна кістка, зовнішній косий гребінь, гребінь клубової кістки тощо, оскільки вони є класичними джерелами кортикальної та губчастої кістки [13; 14].

Цікаво, що в різних дослідженнях було продемонстровано, що техніка забору має значний вплив на життєздатність клітин у каркасі, а також на майбутню інтеграцію в кістку. Вирішально важливим для рівня успіху аутоотрансплантатів є здатність клініцистів успішно проводити забір аутоотрансплантатів. Було продемонстровано, що аутокістка може бути скомпрометована через порушення техніки забору, а також тривалістю часу між забором та імплантацією [2].

Аутологічні кісткові трансплантати інтегруються в навколишню кістку за допомогою процесу, який називається «повзуче заміщення» [15].

Висока швидкість резорбції може поставити під загрозу клінічні результати аутогенних кісткових трансплантатів [16; 17]. У дослідженнях Johansson et al. на тваринах і людях повідомляється про резорбцію до 56% аутологічного трансплантата кортикальної кістки протягом 4 місяців [18].

Крім того, аутоотрансплантати також можуть піддаватися надмірному ремоделюванню після операції, особливо якщо не використовуються бар'єрні мембрани. Повідомлялося, що середня резорбція накладних трансплантатів, зібраних із гребеня клубової кістки, коливається від 15% до 25% [19].

Метааналіз продемонстрував, що порівняно з кістковими замінниками аутогенна кістка забезпечувала швидше початкове кісткоутворення, але кінцевий обсяг кісткоутворення не відрізнявся від того, що був у разі застосування інших кісткових замінників [20].

Хоча аутологічні трансплантати є єдиними, що мають деякі остеогенні властивості, обмежена доступність, потреба у другій хірургічній ділянці та пов'язана із цим підвищена захворюваність пацієнтів обмежують їх клінічне використання і спонукають до пошуку альтернатив.

Алотрансплантати. Алотрансплантати можуть бути отримані як від сумісного живого донора, так і з трупних кісткових джерел [21].



Свіжа, непідготовлена алогенна кістка містить клітинні компоненти і може бути остеогенною, але натепер майже не використовується через побоювання передачі захворювань та імуногенної відповіді організму. Методи, що застосовуються для подовження терміну придатності та зменшення імуногенності, руйнують клітинні компоненти і таким чином позбавляють матеріал остеогенних властивостей.

Перевагами є: необмежена пропозиція, доступність, зменшення операційної травми і крововтрати. Вони мають особливе значення за великих кісткових дефектів, які потребують структурної підтримки [22; 23].

Властивості матеріалу алотрансплантата безпосередньо пов'язані з його обробленням, джерелом і віком донора, методом підготовки та/або стерилізації. Властивості алогенної кістки можуть значно відрізнятися не тільки від застосованих методів стерилізації, але й від гістологічного типу [15].

Ймовірність, що алотрансплантат може спричинити вірусну інфекцію, залишається від одного на 8 мільйонів до одного на 2 мільйони [24].

Алотрансплантати мають високу вартість оброблення та часто психологічно погано сприймаються пацієнтами, бо в основному отримуються від трупних донорів [25]. Ускладнення також включають переломи, незрощення та інфекції. Бактеріальна інфекція частіше зустрічається в разі збільшення розміру трансплантата і може спостерігатися у понад 10% масивних алотрансплантатів (Lord et al. (1988)).

Алотрансплантати доступні в різних формах: свіжі, свіжозаморожені, ліофілізовані та демінералізовані ліофілізовані [26]. Ліофілізовані та демінералізовані ліофілізовані алотрансплантати все ще успішно використовуються в щелепно-лицевій ділянці. Під час ліофілізації пошкоджуються остеобласти, що обмежує його остеоіндуктивну здатність, період інтеграції з навколишніми тканинами є довшим, порівняно з аутогенним кістковим матеріалом. Piattelli та ін. [27] виявили, що

демінералізований ліофілізований кістковий алотрансплантат реабсорбується й оточується сполучною тканиною, залишаючи порожнину деяких кісткових клітин у порожнистому стані.

Переваги ліофілізованих алотрансплантатів полягають у тому, що матеріал трансплантата розсмоктується набагато повільніше, що надає йому кращих властивостей збереження простору.

Примітно, що алотрансплантати ніколи повністю не замінюються новою кісткою, і частинки алотрансплантата можуть роками залишатися вбудованими в новоутворену кістку.

Посилення регуляторних обмежень щодо використання алотрансплантатів в Європі призвело до переходу до використання синтетичних матеріалів [28; 29].

Ксенотрансплантанти. Ксенотрансплантати – це матеріали, отримані від генетично неспорідненого виду. Найбільш використовуваними є бичачі та свинячі; однак інше походження включає коней, екзоскелет коралів і яєчну шкаралупу [30; 31]. Однією з переваг ксеногенних матеріалів є подібність їхнього хімічного складу до людської кістки, зі співвідношенням кальцію/фосфату 1,67, ідентичним людській кістці [32].

Найпоширенішим джерелом матеріалів у стоматології є депротейнізована бичача кістка (ДБК). Отримана пориста структура дуже нагадує структуру людської кістки й може забезпечити хорошу механічну підтримку та стимулювати загоєння кісток через остеокондукцію. Замінники бичачої кістки мають високу стабільність і низьку імуногенність [33].

Протягом багатьох років навколо ксенотрансплантатів точилися суперечки щодо їх розсмоктування [34; 35]. Є дані, що демонструють їх повну резорбцію в певних тканинах, тоді як багато даних, отриманих у результаті довготривалих гістологічних досліджень, свідчать про те, що вони залишаються навіть після майже десятирічного перебування



в ротовій порожнині. Цей феномен клініцистами пояснюється тим, що ксенотрансплантати в основному були отримані з тваринних джерел і не могли «розщеплюватися» так само ефективно, як людський організм [36].

Ксенотрансплантати не володіють жодним остеогенним або остеоіндуктивним потенціалом завдяки повній депротейнізації (алотрансплантати є кращими індукторами кісткової тканини). Ксенотрансплантати зберігають свій об'єм [15]. Вони не здатні сприяти проліферації клітин і, крім того, вони є єдиною групою, яка не індукуює спонтанну диференціацію остеобластів із МСК або не має здатності індукувати ектопічне утворення кісткової тканини [37; 38].

Існують суперечки, що базуються на даних проведених гістологічних досліджень щодо передачі захворювань, які можуть виникнути в разі використання цих матеріалів, хоча компанії, які продають ксеногенні матеріали, гарантують, що їхня продукція повністю вільна від будь-яких органічних матеріалів [39].

Критично важливим для довготривалої стабільності імплантату є контакт між кісткою та імплантатом. Оскільки ксенотрансплантати не резорбуються і не замінюються з часом, контакт між кісткою та імплантатом може бути зменшений, оскільки деякі частинки ДБК будуть вирізані під час підготовки до остеотомії і згодом залишаться в контакті з поверхнею імплантату протягом тривалого часу.

Синтетичні матеріали. Синтетичні кісткові замінники – це мінеральні структури, подібні до мінерального вмісту людської кістки, включаючи фосфат кальцію або кераміку з фосфату кальцію, наприклад, гідроксиапатит (ГА), трикальцій фосфат (ТКФ) і двофазний фосфат кальцію (ДКФ = ГА + ТКФ). Вони виготовлені з неорганічних, неметалевих матеріалів із кристалічною структурою. Більшість синтетичних замінників кістки тверді, пористі, але крихкі. Вони мають лише остеокондуктивні властивості [40].

Гідроксиапатити структурно міцні й нагадують мінеральний компонент кістки. Три-

кальційфосфати – легше резорбуються, але не мають механічної міцності. Тому існує багато різних комбінацій цих двох компонентів. Синтетичні матеріали зазвичай є просто остеокондуктивними [41]. Активним напрямом досліджень є поєднання синтетичних матеріалів з факторами росту та іншими активними компонентами для створення остеоіндуктивних матеріалів.

Баланс між швидким утворенням кісткової тканини та одночасною біодеградацією становить особливий інтерес під час аугментації альвеолярного відростка та подальшого встановлення зубного імплантату (Misch and Dietsh, 1993), оскільки необхідне формування функціональної кісткової тканини на поверхні зубного імплантату [42; 43].

Кальцій-фосфатна біокераміка (КФК) нині є золотим стандартом синтетичних кісткових замінників [44]. Вона є перспективною завдяки біосумісності, остеокондуктивності та остеоіндуктивності [45; 46]. Тривимірна пориста структура є вирішальною для індукції нової кістки [47]. У низці досліджень показано, що фазовий склад є одним із найважливіших факторів індукції кісткоутворення [48]. Експерименти підтвердили, що пориста КФК може індукувати кісткоутворення, тоді як щільна КФК не може [49]. Крім того, мікропори (діаметр пор < 10 мкм) відіграють вирішальну роль у стимулюванні остеогенезу [50]. Мікропори на стінках макропор не тільки сприяють проникненню рідин організму, але також створюють шорсткі поверхні на стінках, які є сприятливими для прикріплення клітин і експресії остеогенного фенотипу. У кількох дослідженнях повідомляється, що нанотопграфія може стимулювати диференціювання МСК за відсутності остеогенних добавок, сторонніх факторів росту чи цитокінів [51]. Окрім пор макро- та мікророзміру, нещодавно було виявлено, що пори нанорозміру (<100 нм) відіграють позитивну роль в індукції остеогенезу (Cornell, 1999, Klawitter and Weinstein, 1974) [52]. Численні дослідження показали, що нанокераміка CaP має високу питому



Таблиця 1

Порівняння доступних груп кісткових замінників та їх властивостей

Тип матеріалу	Остеогенність	Остеоіндуктивність	Остеокондуктивність	Резорбція	Імунні ризики	Ризик інфекцій/передачі хвороб	Механічна підтримка	Доступність /Вартість	Типові показання	Ключові недоліки
Аутогенний	Висока (живі остеопрогенітори)	Є (фактори росту)	Є	Середня/висока; можливе значне ремоделювання	Немає	Низький	Висока (особливо кортикальні блоки)	Обмежена кількість; висока «ціна» через другу операцію	Великі дефекти, підвищені вимоги до остеогенезу, синус-ліфт	Декілька операційних локусів, донорська морбідність, біль, резорбція, післяопераційний біль, тривалість операції.
Алогенний	Низька (після обробки клітинність втрачена)	Низька/змінна (DFDBA – потенційна)	Є	Повільна/змінна	Можливі	Дуже низький, але не нульовий; залежить від обробки	Середня	Добра доступність; вища вартість через обробку	Середні/великі дефекти, коли авто – неможливий	Імуногенність, повільна інтеграція, варіабельність якості
Ксеногенний	Немає	Немає	Є (добра)	Дуже повільна/часто збереження частинок	Низькі	Теоретичний; залежно від очищення	Добра (тривале збереження об'єму)	Широко доступні; середня/висока ціна	Синус-ліфт, збереження простору, контурна аугментація	Довга персистенція частинок, менший контакт кістка-імплантат
Синтетичні Ca-P (HA, β-TCP, BCP)	Немає (як правило)	Обмежена/контрольована (залежить від пористості/допінгу/носіїв)	Є (висока)	Налаштовування: HA – повільна; β-TCP – швидка; BCP – керована	Немає	Немає (матеріал інертний/біоактивний)	Середня; залежить від форми/пористості	Висока доступність; зазвичай низька вартість	Малі/середні дефекти, навколо імплантатів, синус-ліфт (залежно від формуляції)	Відсутність власної остеогенності; іноді недостатня механіка великих дефектів



поверхню та покращені механічні властивості [53; 54]. У деяких дослідженнях повідомляється, що нанокераміка має чудову здатність зменшувати апоптичну загибель клітин, покращуючи таким чином клітинну проліферацію [55].

Специфічна запальна реакція тканин на остеоіндуктивну кераміку є важливим фактором, який надає матеріальну остеоіндуктивність. Макрофаги/моноцити беруть участь у процесі запалення, а також у процесі ремоделювання або відновлення кістки. Це разом із появою таких клітин в ектопічному кістковому утворенні, індукованому КФК, створює зв'язок між запальною відповіддю та процесом остеоіндукції КФК [56].

Деградація матеріалів відбувається за гідролітичним процесом; інтратрабекулярні інтегровані керамічні залишки лежать в основі динамічного процесу ремоделювання і будуть повністю замінені природною кісткою (Daculsi et al., 1990; Horch et al., 2006) [57].

Двофазна кальцій-фосфатна кераміка (ДКФК)

ДКФК об'єднує властивості ТКФ та ГА, забезпечуючи швидку регенерацію кісткової тканини та покращені механічні характеристики. Завдяки зміні співвідношення ГА/ТКФ можна контролювати резорбцію та остеопривідність матеріалу. ДКФК поєднує високу біосумісність ГА, який повільно розсмоктується та слугує каркасом для кісткової тканини, зі швидкою резорбцією ТКФ, що сприяє кісткоутворенню [58].

Дослідження показали, що матеріал зі співвідношенням 30% ГА та 70% β -ТКФ сприяє вищій експресії кісткового морфогенетичного білка-2 (КМБ-2), а отже, активніше стимулює новоутворення кістки. Водночас матеріал 60% ГА та 40% β -ТКФ (ДКФК 60/40) зберігає об'єм, але повільніше ремоделюється. ДКФК 60/40 успішно використовується для кісткової

аугментації для встановлення зубних імплантатів [59]; однак високий відсоток ГА (40%) може перешкоджати ефективному ремоделюванню кістки. ДКФК 60/40 є найповільніше резорбуючим варіантом ДКФК, який наразі використовується в клініці, тоді як кістковий замінник зі 100% β -ТКФ має найкоротший час резорбції і може занадто рано втратити свої каркасні властивості.

Дослідження показали, що за кісткових дефектів ДКФК 20/80 забезпечує новоутворення кісткової тканини, подібне до аутологічної, через 52 тижні, тоді як ДКФК 60/40 більше нагадує мінерал бичачої кістки, тож високий вміст ГА може сповільнювати ремоделювання кістки [60].

У таблиці 1 наведено основні робочі параметри та характеристики груп кістковозамісних матеріалів, що, на наш погляд, варто виділити та прийняти до уваги лікарю-практику у своїй щоденній роботі.

Висновки. Незважаючи на значні успіхи в розробленні та клінічному застосуванні кістковозамісних матеріалів, жоден із них не є універсальним, а є варіантом вибору в певній клінічній ситуації, що зумовлює необхідність подальших досліджень щодо їх оптимізації та комбінованого використання.

Серед запропонованих нині на ринку матеріалів вибір хірурга лежить у площині низки факторів, як-от економічна доступність, клініко-анатомічні передумови (розмір дефекту, розмір, форма та об'єм трансплантата), біомеханічні властивості, етичні питання, біологічні характеристики та пов'язані з ними ускладнення.

ДКФК є реальною перспективною альтернативою сучасним прототипам навіть у своєму класі завдяки поєднанню механічної стабільності, контрольованої резорбції та здатності сприяти остеогенезу або застосовуватися в ролі скаффолду.

Література:

1. Elsalanty M. E., Genecov D. G. Bone grafts in craniofacial surgery. *Craniofacial Trauma & Reconstruction*. 2009. Vol. 2, No. 3. P. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0029-1215875>.
2. de Sousa C. A., Lemos C. A. A. et al. Bone augmentation using autogenous bone versus biomaterial in the posterior region of atrophic mandibles: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*.



2018. Vol. 76. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.06.014>.
3. Trbakovic A., Hedenqvist P. et al. A new synthetic granular calcium phosphate compound induces new bone in a sinus lift rabbit model. *Journal of Dentistry*. 2018. Vol. 70. P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.12.009>.
4. Sandberg O. H., Aspenberg P. Inter-trabecular bone formation: a specific mechanism for healing of cancellous bone. *Acta Orthopaedica*. 2016. Vol. 87, No. 5. P. 459–465. DOI: <https://doi.org/10.1080/17453674.2016.1205172>.
5. Kolk A., Handschel J. et al. Current trends and future perspectives of bone substitute materials—from space holders to innovative biomaterials. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 2012. Vol. 40, No. 8. P. 706–718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2012.01.002>.
6. Spin-Neto R., Stavropoulos A. et al. Fate of autologous and fresh-frozen allogeneic block bone grafts used for ridge augmentation: a CBCT-based analysis. *Clinical Oral Implants Research*. 2013. Vol. 24, No. 2. P. 167–173. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2011.02324.x>.
7. Sapoznikov L., Humphrey M. Progress in dentin-derived bone graft materials: a new xenogeneic dentin-derived material with retained organic component allows for broader and easier application. *Cells*. 2024. Vol. 13, No. 21. P. 1806. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells13211806>.
8. Schmidt A. H. Autologous bone graft: is it still the gold standard? *Injury*. 2021. Vol. 52, Suppl. 2. P. S18–S22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.01.043>.
9. Redko N., Drobyshev A. et al. Comparative effectiveness of an autologous dentin matrix for alveolar ridge preservation. *Medicina*. 2024. Vol. 60, No. 8. P. 1280. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina60081280>.
10. Crespi R., Vinci R., Romanos P. Calvarial versus iliac crest for autologous bone graft material for a sinus lift procedure: a histomorphometric study. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 2007. Vol. 22, No. 4. P. 527–532.
11. Froum S. J., Wallace S. S. et al. Comparison of mineralized cancellous bone allograft (Puros) and anorganic bovine bone matrix (Bio-Oss) for sinus augmentation: histomorphometry at 26 to 32 weeks after grafting. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*. 2006. Vol. 26, No. 6. P. 543–551.
12. Christensen J. G., Grønlund G. P. et al. Horizontal alveolar ridge augmentation with xenogenic block grafts compared with autogenous bone block grafts for implant-retained rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Oral & Maxillofacial Research*. 2023. Vol. 14, No. 2. e1. DOI: <https://doi.org/10.5037/jomr.2023.14201>.
13. Miron R. J. Optimized bone grafting. *Periodontology 2000*. 2024. Vol. 94, No. 1. P. 143–160. DOI: <https://doi.org/10.1111/prd.12517>.
14. Donos N., Akcali A. et al. Bone regeneration in implant dentistry: which are the factors affecting the clinical outcome? *Periodontology 2000*. 2023. Vol. 93, No. 1. P. 26–55. DOI: <https://doi.org/10.1111/prd.12518>.
15. Kalsi A. S., Bassi S. Alveolar ridge conservation: why, when and how. *British Dental Journal*. 2019. Vol. 227, No. 4. P. 264–274. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41415-019-0647-2>.
16. Pan J., Xu Q., Hou J. Effect of platelet-rich fibrin on alveolar ridge preservation: a systematic review. *Journal of the American Dental Association*. 2019. Vol. 150, No. 9. P. 766–778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adaj.2019.04.025>.
17. Khojasteh A., Kheiri L. et al. Guided bone regeneration for the reconstruction of alveolar bone defects. *Annals of Maxillofacial Surgery*. 2017. Vol. 7, No. 2. P. 263–277. DOI: https://doi.org/10.4103/ams.ams_76_17.
18. Kloss F. R., Offermanns V., Kloss-Brandstätter A. Comparison of allogeneic and autogenous bone grafts for augmentation of alveolar ridge defects: a 12-month retrospective radiographic evaluation. *Clinical Oral Implants Research*. 2018. Vol. 29, No. 11. P. 1163–1175. DOI: <https://doi.org/10.1111/clr.13380>.
19. Yamada M., Egusa H. Current bone substitutes for implant dentistry. *Journal of Prosthodontic Research*. 2018. Vol. 62, No. 2. P. 152–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.08.010>.
20. Roberts T. T., Rosenbaum A. J. Bone grafts, bone substitutes and orthobiologics: the bridge between basic science and clinical advancements in fracture healing. *Organogenesis*. 2012. Vol. 8, No. 2. P. 114–124. DOI: <https://doi.org/10.4161/org.23306>.
21. Calori G. M., Mazza E. et al. The use of bone-graft substitutes in large bone defects: any specific needs? *Injury*. 2011. Vol. 42, Suppl. 2. P. S56–S63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2011.06.011>.
22. Zhang S., Li X. et al. Comparison of autogenous tooth materials and other bone grafts. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. 2021. Vol. 18, No. 3. P. 327–341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13770-021-00333-4>.
23. Ferraz M. P. Bone grafts in dental medicine: an overview of autografts, allografts and synthetic materials. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 11. P. 4117. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16114117>.
24. Sapoznikov L., Humphrey M. Progress in dentin-derived bone graft materials: a new xenogeneic dentin-derived material with retained organic component allows for broader and easier application. *Cells*. 2024. Vol. 13, No. 21. P. 1806. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells13211806>.



25. Piattelli A., Scarano A. et al. Comparison of bone regeneration with the use of mineralized and demineralized freeze-dried bone allografts: a histological and histochemical study in man. *Biomaterials*. 1996. Vol. 17, No. 12. P. 1127–1131. DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(96\)85915-1](https://doi.org/10.1016/0142-9612(96)85915-1).
26. Fernandez de Grado G., Keller L. et al. Bone substitutes: a review of their characteristics, clinical use, and perspectives for large bone defects management. *Journal of Tissue Engineering*. 2018. Vol. 9. P. 2041731418776819. DOI: <https://doi.org/10.1177/2041731418776819>.
27. Winkler T., Sass F. et al. A review of biomaterials in bone defect healing, remaining shortcomings and future opportunities for bone tissue engineering: the unsolved challenge. *Bone & Joint Research*. 2018. Vol. 7, No. 10. P. 232–243. DOI: <https://doi.org/10.1302/2046-3758.73.BJR-2017-0270.R1>.
28. Kurkcu M., Benlidayi M. E. et al. Anorganic bovine-derived hydroxyapatite vs beta-tricalcium phosphate in sinus augmentation: a comparative histomorphometric study. *Journal of Oral Implantology*. 2012. Vol. 38, No. 6. P. 519–526. DOI: <https://doi.org/10.1563/AAID-JOI-D-11-00061>.
29. Zhao R., Yang R. et al. Bone grafts and substitutes in dentistry: a review of current trends and developments. *Molecules*. 2021. Vol. 26, No. 10. P. 3007. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26103007>.
30. Friedmann A., Strietzel F. P. et al. Histological assessment of augmented jaw bone utilizing a new collagen barrier membrane compared to a standard barrier membrane to protect a granular bone substitute material. *Clinical Oral Implants Research*. 2002. Vol. 13, No. 6. P. 587–594.
31. Hammerle C. H., Chiantella G. C. et al. The effect of a deproteinized bovine bone mineral on bone regeneration around titanium dental implants. *Clinical Oral Implants Research*. 1998. Vol. 9, No. 3. P. 151–162.
32. Ayna M., Acil Y., Gulses A. Fate of a bovine-derived xenograft in maxillary sinus floor elevation after 14 years: histologic and radiologic analysis. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*. 2015. Vol. 35, No. 5. P. 541–547.
33. Miron R. J., Sculean A. et al. Osteoinductive potential of a novel biphasic calcium phosphate bone graft in comparison with autografts, xenografts, and DFDBA. *Clinical Oral Implants Research*. 2016. Vol. 27, No. 6. P. 668–675. DOI: <https://doi.org/10.1111/clr.12642>.
34. Miron R. J., Zhang Q. et al. Osteoinductive potential of 4 commonly employed bone grafts. *Clinical Oral Investigations*. 2016. Vol. 20, No. 8. P. 2259–2265. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00784-016-1772-2>.
35. Carmagnola D., Adriaens P., Berglundh T. Healing of human extraction sockets filled with Bio-Oss. *Clinical Oral Implants Research*. 2003. Vol. 14, No. 2. P. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.2003.140201.x>.
36. Lima R. G., Lima T. G. et al. Bone volume dynamics and implant placement torque in horizontal bone defects reconstructed with autologous or xenogeneic block bone: a randomized, controlled, split-mouth, prospective clinical trial. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 2018. Vol. 33, No. 4. P. 888–894.
37. Susin C., Lee J. F. et al. Screening of hydroxyapatite biomaterials for alveolar augmentation using a rat calvaria critical-size defect model: bone formation/maturation and biomaterials resolution. *Biomolecules*. 2022. Vol. 12, No. 11. P. 1677. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom12111677>.
38. Wüster J., Neckel N. et al. Effect of a synthetic hydroxyapatite-based bone grafting material compared to established bone substitute materials on regeneration of critical-size bone defects in the ovine scapula. *Regenerative Biomaterials*. 2024. Vol. 11. rbae041. DOI: <https://doi.org/10.1093/rb/rbae041>.
39. Ferraz M. P. Bone grafts in dental medicine: an overview of autografts, allografts and synthetic materials. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 11. P. 4117. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16114117>.
40. Hou X., Zhang L. et al. Calcium phosphate-based biomaterials for bone repair. *Journal of Functional Biomaterials*. 2022. Vol. 13, No. 4. P. 187. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb13040187>.
41. Denry I., Kuhn L. T. Design and characterization of calcium phosphate ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Dental Materials*. 2016. Vol. 32, No. 1. P. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.10.007>.
42. Yuan H., Yang Z., Li Y. et al. Osteoinduction by calcium phosphate biomaterials. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 1998. Vol. 9, No. 12. P. 723–726. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008877426794>.
43. Samavedi S., Whittington A. R., Goldstein A. S. Calcium phosphate ceramics in bone tissue engineering: a review of properties and their influence on cell behavior. *Acta Biomaterialia*. 2013. Vol. 9, No. 8. P. 8037–8054. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.03.004>.
44. Zhang X., Zhou J., Chen W. et al. A calcium phosphate bioceramics with osteoinduction. In: *Proceedings of the 4th World Biomaterials Congress*, Berlin, Germany, 24–28. 1992.
45. McNamara L. E., McMurray R. J., Biggs M. J. et al. Nanotopographical control of stem cell differentiation. *Journal of Tissue Engineering*. 2010. Vol. 1. 120623. DOI: <https://doi.org/10.4061/2010/120623>.
46. Lock J., Liu H. Nanomaterials enhance osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells similar to a short peptide of BMP-7. *International Jour-*



- nal of Nanomedicine*. 2011. Vol. 6. P. 2769–2777. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S24493>.
47. Li Q., Feng C. et al. Strategies of strengthening mechanical properties in the osteoinductive calcium phosphate bioceramics. *Regenerative Biomaterials*. 2023. Vol. 10. rbad013. DOI: <https://doi.org/10.1093/rb/rbad013>.
 48. Ievlev V. M., Kostyuchenko A. V. et al. Structure and nanohardness of compact hydroxyapatite-based ceramics. *Inorganic Materials*. 2019. Vol. 55. P. 1054–1060.
 49. Wang Y., Wang M. et al. Enhancing mechanical and biological properties of biphasic calcium phosphate ceramics by adding calcium oxide. *Journal of the American Ceramic Society*. 2021. Vol. 104, No. 2. P. 548–563. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.17683>.
 50. Hu X., Zhang W., Hou D. Synthesis, microstructure and mechanical properties of tricalcium phosphate–hydroxyapatite (TCP/HA) composite ceramic. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, No. 7. P. 9810–9816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.157>.
 51. Sutthavas P., Habibovic P., Van Rijt S. H. The shape-effect of calcium phosphate nanoparticle-based films on their osteogenic properties. *Biomaterials Science*. 2021. Vol. 9, No. 5. P. 1754–1766. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0BM01494J>.
 52. Jing W., Dan L., Bo G. et al. Role of biphasic calcium phosphate ceramic-mediated secretion of signaling molecules by macrophages in migration and osteoblastic differentiation of MSCs. *Acta Biomaterialia*. 2017. Vol. 51. P. 447–460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.01.047>.
 53. Gallinetti S., Canal C., Ginebra M. P. Development and characterization of biphasic hydroxyapatite/β-TCP cements. *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. Vol. 97, No. 4. P. 1065–1073. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.12861>.
 54. Jelusic D., Zirk M. L. et al. Monophasic ss-TCP vs biphasic HA/ss-TCP in two-stage sinus floor augmentation procedures: a prospective randomized clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*. 2017. Vol. 28, No. 10. e175. DOI: <https://doi.org/10.1111/clr.12983>.
 55. Fernandez de Grado G., Keller L. et al. Bone substitutes: a review of their characteristics, clinical use, and perspectives for large bone defects management. *Journal of Tissue Engineering*. 2018. Vol. 9. 2041731418776819. DOI: <https://doi.org/10.1177/2041731418776819>.
 56. Bouwman W. F., Bravenboer N. et al. Tissue level changes after maxillary sinus floor elevation with three types of calcium phosphate ceramics: a radiological study with a 5-year follow-up. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 6. P. 1471. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14061471>.

References:

1. Elsalanty, M. E., & Genecov, D. G. (2009). Bone grafts in craniofacial surgery. *Craniofacial Trauma & Reconstruction*, 2(3), 125–134. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1215875>
2. de Sousa, C. A., Lemos, C. A. A., et al. (2018). Bone augmentation using autogenous bone versus biomaterial in the posterior region of atrophic mandibles: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 76, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.06.014>
3. Trbakovic, A., Hedenqvist, P., et al. (2018). A new synthetic granular calcium phosphate compound induces new bone in a sinus lift rabbit model. *Journal of Dentistry*, 70, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.12.009>
4. Sandberg, O. H., & Aspenberg, P. (2016). Intertrabecular bone formation: A specific mechanism for healing of cancellous bone. *Acta Orthopaedica*, 87(5), 459–465. <https://doi.org/10.1080/17453674.2016.1205172>
5. Kolk, A., Handschel, J., et al. (2012). Current trends and future perspectives of bone substitute materials—from space holders to innovative biomaterials. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 40(8), 706–718. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2012.01.002>
6. Spin-Neto, R., Stavropoulos, A., et al. (2013). Fate of autologous and fresh-frozen allogeneic block bone grafts used for ridge augmentation: A CBCT-based analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 24(2), 167–173. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2011.02324.x>
7. Brito, M. A., Mecca, C., et al. (2021). Histological comparison between biphasic calcium phosphate and deproteinized bovine bone on critical-size bone defects. *Brazilian Dental Journal*, 32(1), 26–33. <https://doi.org/10.1590/0103-6440202103583>
8. Sapoznikov, L., & Humphrey, M. (2024). Progress in dentin-derived bone graft materials: A new xenogeneic dentin-derived material with retained organic component allows for broader and easier application. *Cells*, 13(21), 1806. <https://doi.org/10.3390/cells13211806>
9. Schmidt, A. H. (2021). Autologous bone graft: Is it still the gold standard? *Injury*, 52(Suppl. 2), S18–S22. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.01.043>
10. Redko, N., Drobyshev, A., et al. (2024). Comparative effectiveness of an autologous dentin matrix for alveolar ridge preservation. *Medicina*, 60(8), 1280. <https://doi.org/10.3390/medicina60081280>



11. Crespi, R., Vinci, R., & Romanos, P. (2007). Calvarial versus iliac crest for autologous bone graft material for a sinus lift procedure: A histomorphometric study. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 22(4), 527–532.
12. Froum, S. J., Wallace, S. S., et al. (2006). Comparison of mineralized cancellous bone allograft (Puros) and anorganic bovine bone matrix (Bio-Oss) for sinus augmentation: Histomorphometry at 26 to 32 weeks after grafting. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 26(6), 543–551.
13. Christensen, J. G., Grönlund, G. P., et al. (2023). Horizontal alveolar ridge augmentation with xenogenic block grafts compared with autogenous bone block grafts for implant-retained rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Oral & Maxillofacial Research*, 14(2), e1. <https://doi.org/10.5037/jomr.2023.14201>
14. Miron, R. J. (2024). Optimized bone grafting. *Periodontology* 2000, 94(1), 143–160. <https://doi.org/10.1111/prd.12517>
15. Donos, N., Akcali, A., et al. (2023). Bone regeneration in implant dentistry: Which are the factors affecting the clinical outcome? *Periodontology* 2000, 93(1), 26–55. <https://doi.org/10.1111/prd.12518>
16. Kalsi, A. S., & Bassi, S. (2019). Alveolar ridge conservation: Why, when and how. *British Dental Journal*, 227(4), 264–274. <https://doi.org/10.1038/s41415-019-0647-2>
17. Pan, J., Xu, Q., & Hou, J. (2019). Effect of platelet-rich fibrin on alveolar ridge preservation: A systematic review. *Journal of the American Dental Association*, 150(9), 766–778. <https://doi.org/10.1016/j.adaj.2019.04.025>
18. Khojasteh, A., Kheiri, L., et al. (2017). Guided bone regeneration for the reconstruction of alveolar bone defects. *Annals of Maxillofacial Surgery*, 7(2), 263–277. https://doi.org/10.4103/ams.ams_76_17
19. Kloss, F. R., Offermanns, V., & Kloss-Brandstätter, A. (2018). Comparison of allogeneic and autogenous bone grafts for augmentation of alveolar ridge defects: A 12-month retrospective radiographic evaluation. *Clinical Oral Implants Research*, 29(11), 1163–1175. <https://doi.org/10.1111/clr.13380>
20. Yamada, M., & Egusa, H. (2018). Current bone substitutes for implant dentistry. *Journal of Prosthodontic Research*, 62(2), 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.08.010>
21. Roberts, T. T., & Rosenbaum, A. J. (2012). Bone grafts, bone substitutes and orthobiologics: The bridge between basic science and clinical advancements in fracture healing. *Organogenesis*, 8(2), 114–124. <https://doi.org/10.4161/org.23306>
22. Kloss, F. R., Offermanns, V., & Kloss-Brandstätter, A. (2018). Comparison of allogeneic and autogenous bone grafts for augmentation of alveolar ridge defects: A 12-month retrospective radiographic evaluation. *Clinical Oral Implants Research*, 29(11), 1163–1175. <https://doi.org/10.1111/clr.13380>
23. Calori, G. M., Mazza, E., et al. (2011). The use of bone-graft substitutes in large bone defects: Any specific needs? *Injury*, 42(Suppl. 2), S56–S63. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2011.06.011>
24. Zhang, S., Li, X., et al. (2021). Comparison of autogenous tooth materials and other bone grafts. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 18(3), 327–341. <https://doi.org/10.1007/s13770-021-00333-4>
25. Ferraz, M. P. (2023). Bone grafts in dental medicine: An overview of autografts, allografts and synthetic materials. *Materials*, 16(11), 4117. <https://doi.org/10.3390/ma16114117>
26. Sapozhnikov, L., & Humphrey, M. (2024). Progress in dentin-derived bone graft materials: A new xenogeneic dentin-derived material with retained organic component allows for broader and easier application. *Cells*, 13(21), 1806. <https://doi.org/10.3390/cells13211806>
27. Piattelli, A., Scarano, A., et al. (1996). Comparison of bone regeneration with the use of mineralized and demineralized freeze-dried bone allografts: A histological and histochemical study in man. *Biomaterials*, 17(12), 1127–1131. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(96\)85915-1](https://doi.org/10.1016/0142-9612(96)85915-1)
28. Fernandez de Grado, G., Keller, L., et al. (2018). Bone substitutes: A review of their characteristics, clinical use, and perspectives for large bone defects management. *Journal of Tissue Engineering*, 9, 2041731418776819. <https://doi.org/10.1177/2041731418776819>
29. Winkler, T., Sass, F., et al. (2018). A review of biomaterials in bone defect healing, remaining shortcomings and future opportunities for bone tissue engineering: The unsolved challenge. *Bone & Joint Research*, 7(10), 232–243. <https://doi.org/10.1302/2046-3758.73.BJR-2017-0270.R1>
30. Kurkcu, M., Benlidayi, M. E., et al. (2012). Anorganic bovine-derived hydroxyapatite vs beta-tricalcium phosphate in sinus augmentation: A comparative histomorphometric study. *Journal of Oral Implantology*, 38(6), 519–526. <https://doi.org/10.1563/AAID-JOI-D-11-00061>
31. Zhao, R., Yang, R., et al. (2021). Bone grafts and substitutes in dentistry: A review of current trends and developments. *Molecules*, 26(10), 3007. <https://doi.org/10.3390/molecules26103007>
32. Friedmann, A., Strietzel, F. P., et al. (2002). Histological assessment of augmented jaw bone utilizing a new collagen barrier membrane compared to a standard barrier membrane to protect a granular



- bone substitute material. *Clinical Oral Implants Research*, 13(6), 587–594.
33. Hammerle, C. H., Chiantella, G. C., et al. (1998). The effect of a deproteinized bovine bone mineral on bone regeneration around titanium dental implants. *Clinical Oral Implants Research*, 9(3), 151–162.
 34. Ayna, M., Acil, Y., & Gulses, A. (2015). Fate of a bovine-derived xenograft in maxillary sinus floor elevation after 14 years: Histologic and radiologic analysis. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 35(5), 541–547.
 35. Carmagnola, D., Adriaens, P., & Berglundh, T. (2003). Healing of human extraction sockets filled with Bio-Oss. *Clinical Oral Implants Research*, 14(2), 137–143. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.2003.140201.x>
 36. Lima, R. G., Lima, T. G., et al. (2018). Bone volume dynamics and implant placement torque in horizontal bone defects reconstructed with autologous or xenogeneic block bone: A randomized, controlled, split-mouth, prospective clinical trial. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 33(4), 888–894.
 37. Susin, C., Lee, J. F., et al. (2022). Screening of hydroxyapatite biomaterials for alveolar augmentation using a rat calvaria critical-size defect model: Bone formation/maturation and biomaterials resolution. *Biomolecules*, 12(11), 1677. <https://doi.org/10.3390/biom12111677>
 38. Wüster, J., Neckel, N., et al. (2024). Effect of a synthetic hydroxyapatite-based bone grafting material compared to established bone substitute materials on regeneration of critical-size bone defects in the ovine scapula. *Regenerative Biomaterials*, 11, rbae041. <https://doi.org/10.1093/rb/rbae041>
 39. Hou, X., Zhang, L., et al. (2022). Calcium phosphate-based biomaterials for bone repair. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(4), 187. <https://doi.org/10.3390/jfb13040187>
 40. Denry, I., & Kuhn, L. T. (2016). Design and characterization of calcium phosphate ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Dental Materials*, 32(1), 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.10.007>
 41. Yuan, H., Yang, Z., Li, Y., et al. (1998). Osteoinduction by calcium phosphate biomaterials. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 9(12), 723–726. <https://doi.org/10.1023/A:1008877426794>
 42. Samavedi, S., Whittington, A. R., & Goldstein, A. S. (2013). Calcium phosphate ceramics in bone tissue engineering: A review of properties and their influence on cell behavior. *Acta Biomaterialia*, 9(8), 8037–8054. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.03.004>
 43. Zhang, X., Zhou, J., Chen, W., et al. (1992). A calcium phosphate bioceramics with osteoinduction. In *Proceedings of the 4th World Biomaterials Congress*, Berlin, Germany, 24–28.
 44. McNamara, L. E., McMurray, R. J., Biggs, M. J., et al. (2010). Nanotopographical control of stem cell differentiation. *Journal of Tissue Engineering*, 1, 120623. <https://doi.org/10.4061/2010/120623>
 45. Lock, J., & Liu, H. (2011). Nanomaterials enhance osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells similar to a short peptide of BMP-7. *International Journal of Nanomedicine*, 6, 2769–2777. <https://doi.org/10.2147/IJN.S24493>
 46. Zhang, K., Zhang, J., et al. (2018). In vitro and in vivo assessment of nanostructured porous biphasic calcium phosphate ceramics for promoting osteogenesis in an osteoporotic environment. *RSC Advances*, 8(26), 14646–14653. <https://doi.org/10.1039/c8ra00768c>
 47. Li, Q., Feng, C., et al. (2023). Strategies of strengthening mechanical properties in the osteoinductive calcium phosphate bioceramics. *Regenerative Biomaterials*, 10, rbad013. <https://doi.org/10.1093/rb/rbad013>
 48. Ievlev, V. M., Kostyuchenko, A. V., et al. (2019). Structure and nanohardness of compact hydroxyapatite-based ceramics. *Inorganic Materials*, 55, 1054–1060.
 49. Wang, Y., Wang, M., et al. (2021). Enhancing mechanical and biological properties of biphasic calcium phosphate ceramics by adding calcium oxide. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(2), 548–563. <https://doi.org/10.1111/jace.17683>
 50. Hu, X., Zhang, W., & Hou, D. (2020). Synthesis, microstructure and mechanical properties of tricalcium phosphate-hydroxyapatite (TCP/HA) composite ceramic. *Ceramics International*, 46(7), 9810–9816. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.157>
 51. Sutthavas, P., Habibovic, P., & Van Rijt, S. H. (2021). The shape-effect of calcium phosphate nanoparticle-based films on their osteogenic properties. *Biomaterials Science*, 9(5), 1754–1766. <https://doi.org/10.1039/D0BM01494J>
 52. Jing, W., Dan, L., Bo, G., et al. (2017). Role of biphasic calcium phosphate ceramic-mediated secretion of signaling molecules by macrophages in migration and osteoblastic differentiation of MSCs. *Acta Biomaterialia*, 51, 447–460. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.01.047>
 53. Gallinetti, S., Canal, C., & Ginebra, M. P. (2014). Development and characterization of biphasic hydroxyapatite/ β -TCP cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(4), 1065–1073. <https://doi.org/10.1111/jace.12861>
 54. Jelusic, D., Zirk, M. L., et al. (2017). Monophasic ss-TCP vs biphasic HA/ss-TCP in two-stage sinus floor augmentation procedures: A prospective



- randomized clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, 28(10), e175. <https://doi.org/10.1111/clr.12983>
55. Fernandez de Grado, G., Keller, L., et al. (2018). Bone substitutes: A review of their characteristics, clinical use, and perspectives for large bone defects management. *Journal of Tissue Engineering*, 9, 2041731418776819. <https://doi.org/10.1177/2041731418776819>
56. Bouwman, W. F., Bravenboer, N., et al. (2021). Tissue level changes after maxillary sinus floor elevation with three types of calcium phosphate ceramics: A radiological study with a 5-year follow-up. *Materials*, 14(6), 1471. <https://doi.org/10.3390/ma14061471>

Конфлікт інтересів: відсутній.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2025

Стаття прийнята 02.10.2025

Статтю опубліковано 01.12.2025

