

Олександр Любченко, Владислав Петрашко

Харківський національний медичний університет Міністерства охорони здоров'я України,
м. Харків, Україна

Експериментальне порівняння репаративних процесів у кісткових дефектах щелеп кроликів за використання біологічних і синтетичних матеріалів

Актуальність. Вибір оптимального кістково-пластичного матеріалу є актуальною проблемою щелепно-лицевої хірургії, особливо в умовах необхідності ефективного імпортозаміщення. На вітчизняному ринку представлені як синтетичні матеріали (зокрема, β -ТКФ-кераміка), так і ксеногенні колагеновмісні матрикси. Останнім часом активно впроваджуються такі українські продукти, як ксеноматеріал Bauers® та синтетичний гідроксиапатит ABGraft®, що застосовуються для аугментації альвеолярного гребеня.

Мета дослідження — експериментально оцінити та порівняти репаративні процеси в кісткових дефектах нижньої щелепи кроликів за використання різних за архітектонікою матеріалів: високопористих (Straumann® BoneCeramic®, Bauers®) та стандартних синтетичних (Maxresorb®, ABGraft®) матриксів без додавання аутологічної плазми чи PRF.

Матеріали і методи. Дослідження проведено на 16 кроликах породи Новозеландський білий (6–8 міс., 2,5–3,0 кг), розподілених на чотири рівні групи ($n = 4$). Формували стандартизовані кісткові дефекти розміром 5×3 мм у ділянці кута нижньої щелепи. Оцінювання проводили рентгенологічно (показник *bone fill*) та гістоморфометрично (щільність остеоцитів, васкуляризація) на 30-ту та 60-ту добу. Статистичний аналіз виконували за допомогою критерію ANOVA з post-hoc тестом Шеффе ($p < 0,05$).

Результати. На 60-ту добу показники *bone fill* становили (%): Straumann® — $68,5 \pm 4,2$; Bauers® — $64,2 \pm 3,9$; Maxresorb® — $52,3 \pm 3,6$; ABGraft® — $48,7 \pm 4,4$. Матеріали Straumann® та Bauers® статистично достовірно переважали інші групи ($p = 0,002$). Вітчизняний Bauers® продемонстрував статистичну рівноцінність зі Straumann® (різниця 4,3 %, $p = 0,084$). Щільність остеоцитів на 60-ту добу (клітин/поле зору) ($p < 0,05$): Straumann® — $56,7 \pm 5,8$; Bauers® — $53,4 \pm 5,2$; Maxresorb® — $44,1 \pm 4,7$; ABGraft® — $41,8 \pm 4,3$. Встановлено, що матеріали Bauers® та Straumann® забезпечували динамічніший приріст кісткового заповнення в інтервалі 30–60 днів порівняно з Maxresorb® та ABGraft®, що свідчить про достатній остеоіндуктивний потенціал українського ксеноматеріалу.

Висновки. Експериментально доведено, що високоефективні макропористі матеріали Straumann® та Bauers® мають суттєву перевагу над Maxresorb® і ABGraft® за остеоіндуктивними властивостями. Вітчизняний ксеногенний матеріал Bauers® експериментально еквівалентний імпортованому кістково-пластичному матриксу Straumann® BoneCeramic®, що підтверджує його придатність для імпортозаміщення та дозволяє заощаджувати 250–350 USD/г без втрати остеопластичної ефективності.

Ключові слова: кісткова регенерація, нижня щелепа, кролики, кістково-пластичні матеріали, Bauers®, ABGraft®, Straumann®, Maxresorb®, ксеногенний матрикс, β -трикальційфосфат, гідроксиапатит.

Вступ

Проблема ефективної регенерації кісткової тканини щелеп є однією з найактуальніших у сучасній стоматології та щелепно-лицевій хірургії [1, 2]. Щороку у світі виконують понад 2 млн процедур, які потребують застосування кістково-пластичних матеріалів, зокрема під час дентальної імплантації, синус-ліфтингу, реконструкції посттравматичних онкологічних дефектів [2, 3]. За даними глобальних оглядів, частка втрат кісткової тканини альвеолярних відростків становить 40–60 % після видалення зубів, що ускладнює подальшу імплантацію [4, 5].

В Україні ситуація значно ускладнюється через збільшення кількості бойових травм щелепно-лицевої ділянки. За даними періоду 2022–2024 рр., у прифронтових зонах зареєстровано 415 випадків вогнепальних та вибухових травм, 70–80 % з яких супроводжуються дефектами кісткової тканини розміром 5–20 мм [6]. Ці дефекти часто супроводжуються втратою м'яких тканин, зубів та нейроваскулярних структур, що вимагає комплексного підходу до їхньої реконструкції [6–8].

Традиційно «золотим стандартом» кісткової пластики вважається аутогенний трансплантат (з автологічної кістки клубового гребеня, підборідної ділянки чи маломолкової кістки). Проте істотними недоліками цього методу є необхідність додаткового хірургічного втручання, обмежена кількість графт-матеріалу, а також висока частота ускладнень у донорській зоні (20–40 %), що стимулює активний пошук альтернатив [1, 9, 10].

Сучасний ринок пропонує широкий спектр кістково-пластичних матеріалів, які за походженням поділяють на ксеногенні (зокрема, на основі депротейнізованої бичачої кістки, такі як вітчизняний Bauers®) та синтетичні матрикси (двофазна кальцій-фосфатна кераміка Straumann® BoneCeramic®, β-трикальційфосфат Maxresorb® та гідроксиапатит ABGraft®) [11–17]. Ксеногенні матеріали характеризуються високою остеоіндуктивністю, стабільним збереженням об'єму та достатньою васкуляризацією через природну пористу структуру (70–90 % пористість, пори розміром 200–800 мкм) та колагеновий матрикс [18–22]. Синтетичні матеріали забезпечують прогнозовану резорбцію (6–18 міс.) та заміщення новоутвореною кісткою, але часто поступаються ксеногенним за ступенем заповнення в середньомі великорозмірних дефектах [14–16, 23–25].

На українському ринку представлені як імпорتنі, так і вітчизняні продукти. Синтетичні β-ТКФ-кераміки та ксеногенні колагеномісні матрикси (Bauers®, ABGraft®) успішно застосову-

ються для аугментації альвеолярного гребеня під час імплантації [7, 12, 13, 17]. Вартість імпорتنних матеріалів (близько 400–500 USD/г) значно перевищує ціну вітчизняних аналогів (100–150 USD/г), що робить завдання імпортозаміщення стратегічно важливим [10, 11, 17].

В експериментальних моделях на кроликах широко використовуються стандартизовані кісткові дефекти нижньої щелепи завширшки 5–10 мм і завглибшки 2–3 мм [5, 19, 23, 26, 27]. Дефекти до 6 мм зазвичай заповнюються спонтанно протягом 12 тижнів, тоді як більші (від 8 мм) вважаються критичними або близькими до критичних у box-shaped моделях [23, 26, 27]. Модель з дефектом 5 × 3 мм, як у нашому дослідженні, дозволяє об'єктивно оцінити остеоіндуктивні властивості матеріалів без повного блокування спонтанної регенерації, що робить її придатною для порівняльного аналізу різних за походженням та архітектонікою кісткових замінників [5, 23, 28–30, 32].

Мета дослідження — експериментально порівняти репаративні процеси в кісткових дефектах нижньої щелепи кроликів за використання біологічних (Bauers®) та синтетичних (Straumann®, Maxresorb®, ABGraft®) матеріалів без додавання PRF.

Наукова новизна дослідження

Уперше:

1. Проведено комплексне експериментальне порівняння вітчизняних кістково-пластичних матеріалів Bauers® та ABGraft® з імпортними аналогами Straumann® та Maxresorb® у стандартизованій моделі кісткового дефекту нижньої щелепи кролика з кількісною оцінкою показника *bone fill* та гістоморфометричними параметрами.

2. Доведено статистичну рівноцінність вітчизняного ксеногенного матеріалу Bauers® та імпортного синтетичного Straumann® BoneCeramic® за показниками кісткової регенерації (різниця *bone fill* на 60-ту добу — 4,3 %, $p = 0,084$) та гістологічними характеристиками (щільність остеокитів, васкуляризація).

3. Встановлено статистично значущі відмінності ($p < 0,05$) між біологічними та синтетичними матеріалами за динамікою кісткової регенерації на 30-ту та 60-ту добу спостереження, що обґрунтовує диференційований підхід до вибору матеріалу залежно від клінічної ситуації.

Поглиблено уявлення про роль пористості (70–90 % для біологічних матеріалів проти 60–80 % для більшості синтетичних) та розміру пор (200–800 мкм) у забезпеченні остеоіндукції та ангіогенезу під час регенерації кісткової тканини

щелеп. Удосконалено методику експериментального моделювання кісткових дефектів щелеп із застосуванням стандартизованих параметрів (діаметр 5 мм, глибина 3 мм) та комплексної оцінки (рентгенологічної, гістологічної, морфометричної).

Матеріали та методи

Експериментальна модель

Дослідження проводили на 16 кроликах породи новозеландський білий віком 6–8 міс., масою 2,5–3,0 кг, яких розподілили на чотири групи по чотири тварини в кожній.

Експеримент відповідав вимогам «Керівництва з догляду та використання лабораторних тварин» (Guide for the Care and Use of Laboratory Animals, 1996), Європейської конвенції (1986) та нормам біоетики України.

Хірургічна техніка

Доступ до нижньої щелепи виконували через внутрішній розріз слизової оболонки під загальним наркозом (кетамін — 25 мг/кг, ксилазин — 5 мг/кг). Кістковий дефект діаметром 5 мм та глибиною 3 мм у ділянці кута нижньої щелепи формували алмазною фрезою з безперервним охолодженням 0,9 % розчином NaCl. У кожну групу закладали різні матеріали:

- 1) Straumann® BoneCeramic® (двофазна кальцій-фосфатна кераміка: 60 % гідроксиапатит, 40 % β -трикальційфосфат, Швейцарія);
- 2) Bauers® (ксеногенна кістка великої рогатої худоби, Україна);
- 3) Maxresorb® (β -трикальційфосфат, Німеччина);
- 4) ABGraft® (гідроксиапатит, Україна).

Матеріал щільно укладали в дефект, після чого рану зшивали у два шари. Тваринам проводили антибіотикопрофілактику (енрофлоксацин — 5 мг/кг) протягом 3 діб.

Методи оцінювання

Клінічний стан тварин оцінювали щоденно протягом першого тижня, потім — раз на 3 доби. Рентгенологічний контроль проводили цифровим рентгенапаратом (70 кВ, 7 мАс) на 30-ту та 60-ту добу. Вимірювали лінійну величину кісткового дефекту у двох взаємно перпендикулярних напрямках з подальшим розрахунком площі за формулою еліпса. Показник регенерації (*bone fill*, %) обчислювали як співвідношення площі новоутвореної кістки до первинної площі дефекту.

Гістологічне дослідження проводили після евтаназії тварин через 30 та 60 діб (дві тварини з групи в кожен термін). Зразки фіксували в

10 % нейтральному формаліні, демінералізували в 10 % трилоні Б, виготовляли парафінові блоки. Зрізи завтовшки 5 мкм фарбували гематоксиліном та еозином і за Ван Гізоном. Морфометричний аналіз здійснювали світловим мікроскопом з цифровою камерою при збільшенні у 100 та 200 разів. Вимірювали площу кісткової тканини, щільність остеоцитів, кількість гемокапілярів у полі зору.

Статистичний аналіз

Дані обробляли в пакеті SPSS 26.0. Нормальність розподілу перевіряли за критерієм Шапіро-Вілка. Для порівняння показників між групами застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з post-hoc тестом Шеффе. Парні порівняння між термінами спостереження проводили за t-критерієм Стюдента. Критичний рівень статистичної значущості встановлено на рівні $p < 0,05$. Результати представлені як $M \pm SD$.

Результати

Рентгенологічні дані

На 30-ту добу в усіх групах виявлено ознаки початкової кісткової регенерації у вигляді неоднорідних тіней з нерівними контурами. Середній показник *bone fill* становив (%): Straumann® — $42,3 \pm 3,8$; Bauers® — $39,7 \pm 4,1$; Maxresorb® — $31,5 \pm 3,2$; ABGraft® — $28,8 \pm 2,9$. Статистично значущі відмінності виявлено між групами біологічних та синтетичних матеріалів ($p = 0,003$). Straumann® та Bauers® достовірно перевищували Maxresorb® та ABGraft® ($p < 0,05$ за тестом Шеффе), проте між собою не відрізнялися ($p = 0,427$).

На 60-ту добу показники *bone fill* зросли в усіх групах (%): Straumann® — $68,5 \pm 4,2$; Bauers® — $64,2 \pm 3,9$; Maxresorb® — $52,3 \pm 3,6$; ABGraft® — $48,7 \pm 4,4$. Вірогідні відмінності між групами збереглися ($p = 0,002$). Відсоток регенерації у групі Bauers® був лише на 4,3 % нижчим за Straumann® ($p = 0,084$), що свідчить про статистичну рівноцінність. Динаміка приросту *bone fill* між 30-ю та 60-ю добою була найвищою у групах Straumann® (+26,2 %) та Bauers® (+24,5 %), достовірно перевищуючи приріст у Maxresorb® (+20,8 %) та ABGraft® (+19,9 %) ($p = 0,038$).

Динаміку показника *bone fill* представлено на рис. 1 (лінійний графік середніх значень з помилками середнього для кожної групи на 30-ту і 60-ту добу).

Графік чітко показує перевагу матеріалів-лідерів (Straumann® та Bauers®) уже на ранніх термінах та збереження лідерства до кінця спостереження.

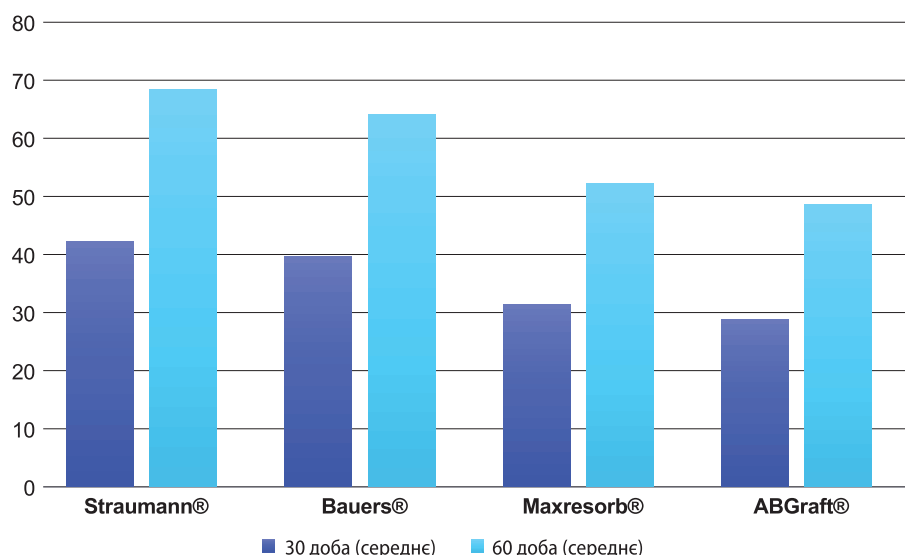


Рис. 1. Динаміка *bone fill* (%) у групах Straumann®, Bauers®, Maxresorb® та ABGraft® на 30-ту та 60-ту добу (середнє ± SD; різні літери — $p < 0,05$ за тестом Шеффе)

Таблиця 1.

Динаміка показника *bone fill* (%) у різних групах

Група	30-та доба	60-та доба	Δ	p
Straumann®	42,3 ± 3,8 ^a	68,5 ± 4,2 ^a	+ 26,2	< 0,001
Bauers®	39,7 ± 4,1 ^a	64,2 ± 3,9 ^a	+ 24,5	< 0,001
Maxresorb®	31,5 ± 3,2 ^b	52,3 ± 3,6 ^b	+ 20,8	< 0,001
ABGraft®	28,8 ± 2,9 ^b	48,7 ± 4,4 ^b	+ 19,9	< 0,001

Примітки: p — для порівняння між 30-ю та 60-ю добою (парний t-тест); ^{a, b} — різні літери позначають статистично значущі відмінності між групами ($p < 0,05$, ANOVA з тестом Шеффе); Δ — абсолютний приріст показника.

Динаміку зміни показника *bone fill* (%) у групах на 30-ту і 60-ту добу спостереження наведено у табл. 1.

Аналіз даних таблиці підтверджує, що матеріали (Straumann® та Bauers®) вже на 30-ту добу демонструють достовірно вищі показники заповнення дефекту порівняно з Maxresorb® та ABGraft® ($p = 0,003$), а до 60-ї доби ця перевага стає ще вираженішою ($p = 0,002$). Крім того, приріст *bone fill* між двома термінами спостереження був максимально вираженим саме в групах Straumann® (+26,2 %) та Bauers® (+24,5 %), що статистично значуще перевищувало динаміку в групах Maxresorb® (+20,8 %) та ABGraft® (+19,9 %) ($p = 0,038$ за тестом Шеффе).

Гістологічні дані

На 30-ту добу у групах лідерів (Straumann® та Bauers®) виявлено інтенсивний остеогенез із утворенням поперечних (анастомозуючих) трабекул кісткової тканини, що проникали у пори матеріалу. Щільність остеоцитів становила $42,3 \pm 5,1$ та $39,8 \pm 4,7$ клітин/поле зору відповідно. У групах із синтетичними матеріалами переважав фіброзний компонент з окремими вогнищами остео-

їдних утворень. Щільність остеоцитів у групах Maxresorb® та ABGraft® була достовірно нижчою ($31,2 \pm 3,9$ та $28,5 \pm 4,1$ клітин/поле зору, $p < 0,05$). Кількість гемокапілярів у зоні дефекту в групах Straumann® та Bauers® перевищувала таку в інших групах на 35–40 % ($p = 0,011$).

На 60-ту добу в групах Straumann® та Bauers® сформувалася зріла кісткова тканина з чіткою архітектонікою трабекул та нормальною морфологією остеоцитів. Щільність остеоцитів зросла до $56,7 \pm 5,8$ та $53,4 \pm 5,2$ клітин/поле зору відповідно. У групі Maxresorb® виявлено часткову резорбцію матеріалу та заміщення його кістковою тканиною зі щільністю остеоцитів $44,1 \pm 4,7$ клітин/поле зору. Група ABGraft® продемонструвала найбільшу втрату об'єму матеріалу (15–20 %) та формування кісткової тканини з неповною структурною організацією (щільність остеоцитів $41,8 \pm 4,3$ клітин/поле зору). Статистичний аналіз підтвердив достовірні переваги матеріалів Straumann® та Bauers® за показниками щільності остеоїдної тканини та васкуляризації ($p < 0,05$).

Гістоморфометричні показники на 60-ту добу наведено у табл. 2. Матеріали Straumann® та Bauers® достовірно перевищували Maxresorb® та

Таблиця 2.

Гістоморфометричні показники на 60-ту добу

Матеріал	Щільність остеоцитів (клітин/поле зору)	Васкуляризація (судин/поле зору)	Втрата об'єму (%)
Straumann®	56,7 ± 5,8 ^a	8,4 ± 1,2 ^a	5–8
Bauers®	53,4 ± 5,2 ^a	7,9 ± 1,1 ^a	8–12
Maxresorb®	44,1 ± 4,7 ^b	5,6 ± 0,9 ^b	20–25
ABGraft®	41,8 ± 4,3 ^b	5,2 ± 0,8 ^b	15–20

Примітки: ^a, ^b — різні літери позначають статистично значущі відмінності між групами ($p < 0,05$, ANOVA з тестом Шеффе); васкуляризацію оцінювали, використовуючи 100-кратне збільшення.

ABGraft® за щільністю остеоцитів та васкуляризацією ($p < 0,05$), водночас втрата об'єму матеріалу була найменшою саме в групах Straumann® та Bauers®.

Обговорення

Отримані результати свідчать про вищу ефективність високопористих кістково-пластичних матеріалів із розгалуженою архітектонікою пор (Straumann® BoneCeramic® та Bauers®) порівняно з іншими досліджуваними зразками (Maxresorb®, ABGraft®) у стандартизованій моделі кісткового дефекту нижньої щелепи кролика діаметром 5 мм та глибиною 3 мм. На 60-ту добу показник *bone fill* у групах Straumann® та Bauers® становив відповідно $68,5 \pm 4,2$ та $64,2 \pm 3,9$ %, тоді як у групах Maxresorb® та ABGraft® — лише $52,3 \pm 3,6$ та $48,7 \pm 4,4$ % ($p = 0,002$). Динаміка приросту *bone fill* між 30-ю та 60-ю добою була найвищою саме у групах лідерів (+26,2 та +24,5 %), що достовірно перевищувало приріст у групах порівняння (+20,8 та +19,9 %, $p = 0,038$).

Ці дані узгоджуються з більшістю сучасних експериментальних досліджень, які демонструють перевагу ксеногенних матеріалів та передових двофазних синтетичних композитів у моделях дефектів щелепи та черепа кроликів [15, 16, 19–21, 33]. Зокрема, у роботах 2020–2025 рр. ксеногенні матеріали на основі депротейнізованої бичачої кістки (DBBM) забезпечують відсоток кісткового заповнення в межах 60–85 % через 8–12 тижнів, тоді як чисті β-ТКФ або ГА/β-ТКФ-композити рідко перевищують 50–60 % без додаткових остеостимулювальних чинників [3, 20, 22, 23, 25].

Ключовим фактором переваги ксеногенних матеріалів є їхня природна мікроструктура (пористість 70–90 %, розмір пор 200–800 мкм, наявність колагенового матриксу), що сприяє адгезії остеобластів, ефективній міграції клітин та швидкому ангиогенезу [8, 15, 16, 19, 21]. У синтетичних матеріалах пористість зазвичай нижча (60–80 %), що обмежує клітинну інфільтрацію та пояснює

меншу щільність остеоцитів та васкуляризацію у наших групах Maxresorb® та ABGraft® [14–16, 23, 24].

Особливо важливо, що вітчизняний ксеногенний матеріал Bauers® продемонстрував статистичну рівноцінність імпортованому Straumann® BoneCeramic® (різниця *bone fill* лише 4,3 %, $p = 0,084$; щільність остеоцитів $53,4 \pm 5,2$ проти $56,7 \pm 5,8$ клітин/поле зору, $p > 0,05$). Це відповідає результатам порівняльних досліджень різних ксеногенних джерел, у яких статистично значущої різниці між якісно обробленими матеріалами зазвичай не виявляли [4, 22, 31, 32]. Дані підтверджують високий рівень контролю якості та достатній остеокондуктивний потенціал українського продукту, що робить його ефективним засобом імпортозаміщення [12, 13, 17].

Синтетичні матеріали Maxresorb® (β-трикальційфосфат) та ABGraft® (гідроксиапатит) забезпечили помірне заповнення (48,7–52,3 %), що повністю відповідає літературним даним для чистих β-ТКФ та ГА-матеріалів без додаткових факторів росту [14–16, 23, 24]. У деяких дослідженнях композити β-ТКФ із сульфатом кальцію (β-ТКФ/CS) демонструють дещо кращі показники (до 60–65 %) завдяки швидкій резорбції та вищій остеогенній активності на ранніх термінах [5, 32]. У нашому дослідженні відсутність комбінації з факторами росту призвела до поступового відставання синтетичних матеріалів за динамікою заповнення та васкуляризацією, що логічно пояснюється меншою пористістю та відсутністю природних остеокондуктивних сигналів [15, 23, 24, 28–30].

Важливим аспектом є те, що обрана модель дефекту (5 × 3 мм) за сучасними визначеннями не є повністю критичним кістковим дефектом (*critical size defect*, CSD) у нижній щелепі кролика. За даними W. Wang та співавт. [7] та інших досліджень, CSD у коробкоподібних моделях нижньої щелепи становить 8 × 3 × 2 мм та більше, тоді як дефекти діаметром до 6 мм зазвичай заповнюються спонтанно протягом 12 тижнів [23, 26, 27]. Це пояснює

відносно високий відсоток заповнення навіть у групах порівняння та підкреслює, що отримані результати є особливо актуальні для дефектів середнього розміру (5–10 мм), характерних для клінічної практики (посттравматичні стани, після видалення зубів, аугментація гребеня) [6, 8, 14].

Отже, експериментально доведено перевагу високопористих матеріалів-лідерів (Straumann® та Bauers®) за їхніми остеокондуктивними властивостями. Вітчизняний ксеногенний матеріал Bauers® експериментально еквівалентний імпортованому Straumann®, що підтверджує його високу якість та придатність для використання як ефективного засобу імпортозаміщення [6, 14].

Обмеження дослідження

Обмеженнями цього дослідження є відносно мала вибірка ($n = 4$ у кожній групі) та відсутність довгострокового спостереження (понад 60 діб). Подальші дослідження потребують збільшення статистичної потужності ($n \geq 8-10$ на групу) та оцінювання результатів через 90–120 діб для повного аналізу ремоделювання. Крім того, модель на кроликах не повністю відтворює умови ротової порожнини людини з високим мікробним навантаженням, що може впливати на клінічні результати [18, 33]. Також у цій роботі не оцінювали механічні властивості новоутвореної кісткової тканини та не досліджували вплив функціонального навантаження на процеси регенерації.

Практична значущість

Отримані результати обґрунтовують доцільність використання вітчизняного ксеногенного матеріалу Bauers® як повноцінної альтернативи імпортованому Straumann® BoneCeramic® під час виконання кісткової пластики щелеп. За експериментально підтвердженою клінічною ефективністю (*bone fill* $64,2 \pm 3,9\%$ на 60-ту добу, щільність остеоцитів $53,4 \pm 5,2$ клітин/поле зору, $p = 0,084$) Bauers® заощаджує 250–350 USD/г матеріалу без втрати остеокондуктивних властивостей.

За результатами дослідження рекомендовано:

- пріоритетне застосування високоефективних макропористих матеріалів (Bauers® та Straumann®) під час аугментації кісткових дефектів середнього та великого розміру (5–20 мм), зокрема у процесі хірургічної реконструкції бойових травм щелепно-лицевої ділянки;
- використання стандартних синтетичних матеріалів (Maxresorb® та ABGraft®) переважно для заповнення невеликих дефектів (до 5 мм), де критично важливими є поступова резорбція матриксу та економічна доступність.

Отримані дані можуть бути безпосередньо впроваджені у практичну діяльність щелепно-лицевих хірургів та стоматологів-хірургів, використані під час розроблення локальних клінічних протоколів, а також у навчальному процесі на циклах спеціалізації, тематичного удосконалення та підвищення кваліфікації лікарів за спеціальністю 221 «Стоматологія».

Висновки

1. У стандартизованій моделі кісткового дефекту нижньої щелепи кролика високопористі матеріали з розгалуженою архітектонікою пор (Straumann® BoneCeramic® та Bauers®) статистично достовірно перевищують стандартні синтетичні матеріали порівняння (Maxresorb® та ABGraft®) за показниками кісткового заповнення (*bone fill*) на 30-ту добу ($42,3 \pm 3,8$ та $39,7 \pm 4,1\%$ проти $31,5 \pm 3,2$ та $28,8 \pm 2,9\%$; $p = 0,003$) та 60-ту добу ($68,5 \pm 4,2$ та $64,2 \pm 3,9\%$ проти $52,3 \pm 3,6$ та $48,7 \pm 4,4\%$; $p = 0,002$).

2. Вітчизняний ксеногенний матеріал Bauers® продемонстрував статистичну рівноцінність імпортованому кістково-пластичному матриксу Straumann® BoneCeramic® за всіма ключовими параметрами регенерації (різниця *bone fill* на 60-ту добу становила лише $4,3\%$, $p = 0,084$; щільність остеоцитів та васкуляризація — $p > 0,05$), що підтверджує його високий остеокондуктивний потенціал та можливість використання як ефективного засобу імпортозаміщення.

3. Синтетичні матеріали Maxresorb® та ABGraft® забезпечили помірну регенерацію ($48,7-52,3\%$ *bone fill* на 60-ту добу) з вираженішою втратою об'єму та нижчою васкуляризацією, що робить їх придатними для заповнення переважно невеликих дефектів (до 5 мм) з пріоритетом швидкої резорбції та економічної доступності.

4. Отримані дані обґрунтовують пріоритетне застосування кістково-пластичних матеріалів із високопористою структурою під час аугментації дефектів середнього та великого розміру (5–20 мм), зокрема в умовах реконструкції бойових травм щелепно-лицевої ділянки.

5. Вітчизняні кістково-пластичні матеріали (Bauers® та ABGraft®) можуть розглядатися як економічно обґрунтована та експериментально ефективна альтернатива імпортованим аналогам за умови подальшого підтвердження отриманих результатів у репрезентативніших клінічних вибірках та під час довгострокового спостереження.

Внесок авторів:

Любченко О. В.:

<https://orcid.org/0009-0008-0368-2189>

формулювання мети роботи, розробка концепції дослідження, наукове керівництво, контроль ходу дослідження та отримання методології, остаточне затвердження статті.

Петрашко В. Я.:

<https://orcid.org/0009-0002-8326-0491>

підбір літературних джерел за темою роботи, виконання клінічних досліджень, збирання та

оброблення даних, написання тексту статті, підготовка статті до публікації.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію

Автори надали згоду на публікацію тексту рукопису.

Використання штучного інтелекту

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

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Vyryva, O. E., & Holovakha, M. L. (2020). Modern approaches to bone plastic surgery in traumatology and orthopedics. *Orthopedics, Traumatology and Prosthetics*, 4, 45–52. [Вирва, О. Є., & Головаха, М. Л. (2020). Сучасні підходи до кісткової пластики в травматології та ортопедії. *Ортопедія, травматологія і протезування*, 4, 45–52].
2. Yakovenko, L. M. et al. (2022). Peculiarities of jaw bone tissue regeneration during dental implantation. *Journal of Dentistry*, 2, 112–120. [Яковенко, Л. М. та ін. (2022). Особливості регенерації кісткової тканини щелеп при дентальній імплантації. *Вісник стоматології*, 2, 112–120].
3. Prysiazhniuk, O. et al. (2025). War-related maxillofacial injuries in Ukraine: a retrospective multicenter study. *Arc. Craniofac. Surg.*, 26(2), 51–58. DOI: <https://doi.org/10.7181/acfs.2024.0074>.
4. Fillingham, Y., & Jacobs, J. (2016). Bone grafts and their substitutes. *Bone Joint J*, 98-B(1), 6–9. DOI: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.98B.36350>.
5. Meara, J. G., Leather, A. J. M., Hagander, L. et al. (2015). Global Surgery 2030: evidence and solutions for achieving health, welfare, and economic development. *The Lancet*, 386(9993), 569–624. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60160-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60160-X).
6. Dobrovolska, O. V. (2019). Comparative characteristics of osteoplastic materials of domestic production. *Implantology. Periodontology. Osteology*, 3, 56–64. [Добровольська, О. В. (2019). Порівняльна характеристика остеопластичних матеріалів вітчизняного виробництва. *Імплантологія. Пародонтологія. Остеологія*, 3, 56–64].
7. Wang, W., & Yeung, K. W. K. (2017). Bone grafts and biomaterials substitutes for bone defect repair: A review. *Bioactive Materials*, 2(4), 224–247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2017.05.007>.
8. Elgali, I., Omar, O., Dahlin, C., & Thomsen, P. (2017). Guided bone regeneration: materials and biological mechanisms revisited. *Eur. J. Oral Sci.*, 125(5), 315–337. DOI: <https://doi.org/10.1111/eos.12364>.
9. Sheikh, Z., Sima, C., & Glogauer, M. (2015). Bone replacement materials and techniques. *Materials*, 8(6), 2953–2993. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma8062953>.
10. Chiapasco, M., & Casentini, P. (2018). Horizontal bone-augmentation procedures in implant dentistry. *Periodontology 2000*, 77(1), 213–240. DOI: <https://doi.org/10.1111/prd.12219>.
11. Buser, D., Chappuis, V., Bornstein, M. M., et al. (2013). Long-term stability of contour augmentation with early implant placement following single tooth extraction in the esthetic zone: a prospective, cross-sectional study in 41 patients with a 5- to 9-year follow-up. *J. Periodontol.*, 84(11), 1517–1527. DOI: <https://doi.org/10.1902/jop.2013.120635>.
12. Jensen, S. S., & Terheyden, H. (2009). Bone augmentation procedures in localized defects in the alveolar ridge: clinical results with different bone grafts and bone-substitute materials. *Int. J. Oral Maxillofac. Implants*, 24, 218–236. PMID: 19885447.
13. Zhang, J., Li, S., He, H., et al. (2024). Clinical guidelines for indications, techniques, and complications of autogenous bone grafting. *Chin. Med. J.*, 137(1), 5–7. DOI: <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000002691>.
14. Dobrovolska, O.V., & Yakovenko, L.M. (2023). Domestic biomaterials for bone grafting: economic and clinical aspects. *Implantology*, 1, 34–42. [Добровольська, О. В., & Яковенко, Л. М. (2023). Вітчизняні біоматеріали для кісткової пластики: економічні та клінічні аспекти. *Імплантологія*, 1, 34–42].

15. Naini, A.Y., Kobrai, S., Jafari, A., et al. (2024). Comparing the effects of Bone+B® xenograft and InterOss® xenograft bone material on rabbit calvaria bone defect regeneration. *Clin. Exp. Dent. Res.*, 10(3), e875. DOI: <https://doi.org/10.1002/cre2.875>.
16. Amid, R., Kadkhodazadeh, M., Kheiri, A., Esfandiari, S. (2024). Comparison of the healing process of xenografts with three different sources in critical-size bone defects: An in vivo study. *J. Adv. Periodontol. Implant. Dent.*, 16(1), 22–29. DOI: <https://doi.org/10.34172/japid.2024.004>.
17. Łuczak, J. W., Palusińska, M., Matak, D., et al. (2024). The Future of Bone Repair: Emerging Technologies and Biomaterials in Bone Regeneration. *Int. J. Mol. Sci.*, 25(23), e12766. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252312766>.
18. Bohner, M., Santoni, B.L.G., & Döbelin, N. (2020). β -tricalcium phosphate for bone substitution: Synthesis and properties. *Acta Biomaterialia*, 113, 23–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.06.022>.
19. Valencia-Llano, C.H., López-Tenorio, D., & Grande-Tovar, C.D. (2022). Biocompatibility assessment of two commercial bone xenografts by in vitro and in vivo methods. *Polymers*, 14(13), e2672. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14132672>.
20. Aleynik, D. Ya., Zhivtsov, O. P., Yudin, V. V., et al. (2024). Specifics of Porous Polymer and Xenogeneic Matrices and of Bone Tissue Regeneration Related to Their Implantation into an Experimental Rabbit Defect. *Polymers*, 16(8), e1165. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16081165>.
21. Hesarak, S., Saba, G., & Shahrezaee, M., et al. (2024). Reinforcing β -tricalcium phosphate scaffolds for potential applications in bone tissue engineering. *Scientific Rep.*, 14, e19055. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68419-2>.
22. Wüster, J., Neckel, N., Sterzik, F., et al. (2024). Effect of synthetic hydroxyapatite-based bone grafting material compared to established bone substitute materials on regeneration of critical-size bone defects in ovine scapula. *Regenerative Biomaterials*, 11, rbae041. DOI: <https://doi.org/10.1093/rb/rbae041>.
23. Schlund, M., Depeyre, A., Ranganath, S.K., et al. (2022). Rabbit calvarial and mandibular critical-sized bone defects as an experimental model for the evaluation of craniofacial bone tissue regeneration. *J. Stomatol. Oral Maxillofac. Surg.*, 123(6), 601–609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2021.12.001>.
24. Ranganath, S. K., Schlund, M., Delattre, J., et al. (2022). Bilateral double site (calvarial and mandibular) critical-size bone defect model in rabbits for evaluation of craniofacial bone tissue engineering constructs. *Mater. Today Bio.*, 14, 100267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100267>.
25. Zuhr O., Rebele, S.F., Cheung, S.L., et al. (2018). Surgery without papilla incision: tunneling flap procedures in plastic periodontal and implant surgery. *Periodontology 2000*, 77(1), 213–240. DOI: <https://doi.org/10.1111/prd.12214>.
26. Monir, A., Mukaibo, T., Abd El-Aal, A. B. M., et al. (2021). Local administration of HMGB-1 promotes bone regeneration on the critical-sized mandibular defects in rabbits. *Scientific Rep.*, 11(1), 8930. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88195-7>.
27. Daneshi, S. S., Tayebi, L., Talaei-Khozani, T., et al. (2024). Reconstructing Critical-Sized Mandibular Defects in a Rabbit Model: Enhancing Angiogenesis and Facilitating Bone Regeneration via a Cell-Loaded 3D-Printed Hydrogel-Ceramic Scaffold Application. *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 10(5), 3316–3330. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.4c00580>.
28. Dulnik, J., Jeznach, O., & Sajkiewicz, P. (2022). A Comparative Study of Three Approaches to Fibre's Surface Functionalization. *J. Funct. Biomater.*, 13(4), 272. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb13040272>.
29. Carlisle, P. L., Guda, T., Silliman, D. T., et al. (2019). Are critical size bone notch defects possible in the rabbit mandible? *J. Korean Assoc. Oral Maxillofac. Surg.*, 45(2), 97–107. DOI: <https://doi.org/10.5125/jkaoms.2019.45.2.97>.
30. Saulacic, N., Fujioka-Kobayashi, M., Kimura Y., et al. (2021). The effect of synthetic bone graft substitutes on bone formation in rabbit calvarial defects. *J. Mater. Sci.: Materials in Medicine*, 32(2), 15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10856-020-06483-6>.
31. Ou, K.-L., Hou, P.-J., Huang, B.-H., et al. (2020). Bone Healing and Regeneration Potential in Rabbit Cortical Defects Using an Innovative Bioceramics Bone Graft Substitute. *Appl. Sci.*, 10(18), 6239. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10186239>.
32. Li, Z., & Li, Z.-B. (2005). Repair of mandible defect with tissue engineering bone in rabbits. *ANZ J. Surg.*, 75(11), 1017–1021. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1445-2197.2005.03586.x>.
33. Abushama, A. A., Alim, N., AlTuraiki, A. M., et al. (2025). Comparison of xenograft and allograft bone graft for oral and maxillofacial surgical preparation prior to dental implantation: A systematic review. *F1000Res.*, 14, 718. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.163924.1>.

Experimental Comparison of Reparative Processes in Mandibular Bone Defects of Rabbits Using Biological and Synthetic Graft Materials

Liubchenko O., Petrashko V.

Kharkiv National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Background. Choosing the optimal bone grafting material remains a critical issue in maxillofacial surgery, particularly given the growing need for effective import substitution. The domestic market features both conventional synthetic materials (specifically, β -TCP ceramics) and xenogenic collagen-containing matrices. Recently, Ukrainian-manufactured products, such as the Bauers® xenograft and ABGraft® synthetic hydroxyapatite, have been actively introduced into clinical practice for alveolar ridge augmentation.

Objective. This study aimed to experimentally evaluate and compare the reparative processes in mandibular bone defects of rabbits using bone graft substitutes with different structural architectures: highly porous matrices (Straumann® BoneCeramic®, Bauers®) and standard synthetic materials (Maxresorb®, ABGraft®) without the addition of autologous platelet-rich fibrin (PRF).

Materials and Methods. The study was conducted on 16 male New Zealand White rabbits (age: 6–8 months, weight: 2.5–3.0 kg), divided into four equal groups ($n = 4$). Standardized box-shaped bone defects measuring 5×3 mm were formed in the region of the mandibular angle. The outcomes were evaluated radiographically (using the bone fill index) and histomorphometrically (osteocyte density, vascularization rate) on days 30 and 60 post-surgery. Statistical analysis was performed using ANOVA followed by Scheffé's post-hoc test ($p < 0.05$).

Results. On day 60, the bone fill values were as follows: Straumann® — $68.5 \pm 4.2\%$, Bauers® — $64.2 \pm 3.9\%$, Maxresorb® — $52.3 \pm 3.6\%$, ABGraft® — $48.7 \pm 4.4\%$. The Straumann® and Bauers® groups significantly outperformed the other groups ($p = 0.002$). The domestic Bauers® material demonstrated statistical equivalence to Straumann® (a difference of only 4.3% , $p = 0.084$). Osteocyte density on day 60 (cells per field of view) was also significantly higher ($p < 0.05$) in the leading groups: Straumann® — 56.7 ± 5.8 ; Bauers® — 53.4 ± 5.2 ; Maxresorb® — 44.1 ± 4.7 ; ABGraft® — 41.8 ± 4.3 . It was established that Bauers® and Straumann® provided a more dynamic increase in bone filling within the 30–60 day interval compared to Maxresorb® and ABGraft®, indicating the high osteoconductive potential of the Ukrainian xenograft.

Conclusions. It has been experimentally proven that highly effective macroporous materials (Straumann® and Bauers®) possess a substantial advantage over Maxresorb® and ABGraft® in terms of their osteoconductive properties. The domestic Bauers® xenograft is experimentally equivalent to the imported Straumann® BoneCeramic® matrix, confirming its high quality and suitability for import substitution, while offering cost savings of 250–350 USD/g without compromising osteoplastic efficiency.

Keywords: bone regeneration, mandible, rabbits, bone grafting materials, xenogeneic matrix, hydroxyapatite, β -tricalcium phosphate, Bauers®, Straumann® BoneCeramic®, ABGraft®, Maxresorb®.

Стаття: надійшла до редакції 27.01.2026 р.;
прийнята до друку 23.03.2026 р.;
опублікована 28.05.2026 р.

Любченко Олександр Володимирович

доктор медичних наук, професор,
завідувач кафедри терапевтичної стоматології, ортодонції, дитячої стоматології та пародонтології Харківського національного медичного університету МОЗУ,
м. Харків, Україна

 <https://orcid.org/0009-0008-0368-2189>

Петрашко Владислав Янович

аспірант кафедри терапевтичної стоматології, ортодонції, дитячої стоматології та пародонтології Харківського національного медичного університету МОЗУ,
м. Харків, Україна

 <https://orcid.org/0009-0002-8326-0491>