

УДК 616.71-007.15-001.5-089.844:615.464](045)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-59872025121-29>

Використання модифікованої біоактивної кераміки під час пластики критичних розмірів посттравматичних кісткових дефектів

В. Л. Шмагой¹, Н. В. Ульянчич², М. В. Юрженко³,
В. В. Коломієць², С. О. Фірстов²

¹ ТОВ «Медичний центр «Добробут-Поліклініка», Київ, Україна

² Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

³ Інститут електророзварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

According to statistical data from the National Military Medical Clinical Center for the period from February to May 2022, bone defects in gunshot fractures accounted for 76 % of cases, with defects exceeding 6 cm — classified as critical — found in 28 % of cases. Currently, the "gold standard" for reconstructing critical bone defects is the induced membrane technique, also known as the two-stage Masquelet technique. The most promising substitute for autologous bone is considered to be biphasic bioactive ceramics. In this study, we aimed to evaluate the feasibility of reconstructing critical bone defects resulting from combat trauma using a modified bioactive ceramic-autograft mixture during the second stage of the Masquelet technique, combined with additive manufacturing technologies. The study included a sample of 36 patients with critical bone defects who underwent reconstruction using the Masquelet technique. During the second stage, the defect was filled with a mixture of calcium phosphate ceramics (CPC) and autologous cancellous bone. We analyzed the treatment outcomes of patients with critical bone defects caused by combat-related injuries over the past 2.5 years who received treatment at the Dobrobut Medical Center. The evaluation criteria included pain levels, range of motion, axial load capacity, functional recovery (work capacity), and radiological signs of callus formation, deformities, graft migration, or remodeling. After 12 months of follow-up: Complete functional recovery (clinically and in range of motion) was achieved in 28 (78 %) patients. Partial functional recovery was observed in 7 (17 %) patients. Significant functional impairment requiring additional surgical interventions occurred in 1 (5 %) patient. Conclusions. Based on our experience, the use of a CPC-autograft mixture in the two-stage reconstruction of critical diaphyseal bone defects provides positive treatment outcomes in most clinical cases. The integration of 3D modeling and biodegradable materials enhances the range of possibilities for performing bone grafting procedures and simplifies technical challenges in reconstructive surgery. Keywords. Critical bone defects, Masquelet technique, bone grafting, bioactive ceramics, additive technologies, bone reconstruction.

За даними статистичного відділу Військово-медичного клінічного центру Північного регіону за період лютий–травень 2022 року кісткові дефекти в разі вогнепальних переломів склали 76 %, із них понад 6 см (критичні) — у 28 %. На сьогодні статусу «золотого стандарту» в реконструкції кісткових дефектів критичного розміру набуває методика індукованої мембрани або двоетапна техніка за Masquelet. Найбільш перспективним замінником аутокістки вважають двофазну біоактивну кераміку. У дослідженні оцінювали можливості реконструкції критичних кісткових дефектів після бойової травми на другому етапі методики Masquelet сумішшю модифікованої біоактивної кераміки й аутоспонгіози, зі застосуванням адитивних технологій. Опрацьовано вибірку з 36 пацієнтів, котрим за критичних розмірів кісткових дефектів послуговувалися методикою Masquelet. На 2-му етапі проводили пластику дефекту з використанням суміші КФК та аутоспонгіози. Проаналізовано результати лікування постраждалих після ВПК із критичними розмірами дефектів кісток кінцівок за останні 2,5 роки, які отримували лікування в «МЦ Добробут». За критерій оцінювання обрали показники болю, обсяг рухів, осьове навантаження і відновлення функції (працездатності), рентген ознаки мозолеутворення, деформацій або міграцій чи перебудови трансплантата. За 12 міс. повне відновлення функції кінцівки клінічно та за обсягом рухів було в 18 (78 %), часткове відновлення функції у 4 (17 %), у 1 (5 %) пацієнта значні порушення, які потребували подальших оперативних втручань. Висновки. Використання суміші КФК і аутоспонгіози за 2-етапного заміщення критичних діафізарних кісткових дефектів дає здебільшого позитивні результати лікування. 3D-моделювання та застосування біодеградуючих матеріалів розширює діапазон можливостей для проведення кістковопластичних маніпуляцій.

Ключові слова. Критичні розміри кісткових дефектів, методика Masquelet, кістково-пластичні маніпуляції, кістковопластична суміш, біоактивна кераміка, адитивні технології

(протокол № 1 від 03.02.2025 р). Від всіх пацієнтів отримано інформовану згоду.

Аналізували лікування постраждалих із кістковими дефектами стегнової (7 випадків (19 %)), плечової (14 осіб (40 %)), великогомілкової (9 (24 %)) та кісток передпліччя (6 (17 %)), отриманими внаслідок бойових травм, без септичних проявів на момент кістково-пластичних маніпуляцій.

Вивчено результати лікування пацієнтів після ВПК із критичними розмірами дефектів кісток кінцівок за останні 2,5 роки, яким проводили реконструкцію із використанням суміші КФК, легованої кремнієм (КФКлК) і аутоспонгіози та з залученням адитивних технологій із 3D-моделювання та друку.

Середній вік постраждалих складав (28 ± 3) року (від 19 до 54), термін лікування хворих від 3,5 до 16 міс. (в середньому 7,3). Чоловіків була переважна більшість — 34 (94 %), жінок — 2 (6 %).

Пластику кісткових дефектів здійснювали в два етапи з використанням РММА спейсерів (polymethylmethacrylate з гентаміцином) на першому етапі за методикою Masquelet. У постраждалих з важкими ВПК цей спосіб обирають для профілактики можливих місцевих інфекційних ускладнень і тимчасового заповнення порожнини кісткового дефекту з метою формування ложа для майбутньої пластики. На першому етапі навкруги заповненого РММА спейсером дефекту індукується мембрана насичена антибіотиком і факторами росту. На другому — пластика дефектів і в цей період зберігалась стабільність кісткових уламків, що дозволяє проводити ранню реабілітацію [10, 12].

Терміни проведення кістковопластичних маніпуляцій дуже різнилися, що обумовлено, на нашу думку, великою кількістю чинників впливу, а саме: якістю і строками проведення первинної хірургічної обробки рани (ПХО) та вторинної обробки (ВХО), котрі найчастіше виконувались у різних клініках, ступенем забрудненості ран, обсягом порушення трофіки та рівнем імунної системи пацієнтів. Тому під час оцінювання строків проведення 2-го етапу методики Masquelet обирали не рекомендовані 2–3 міс. після першого [10, 16], коли вважається найбільш активним процес утворення індукованої мембрани, а термін не менше 1–2 міс. після нормалізації загально-клінічних показників запальних процесів крові та після 2-х негативних результатів мікробіологічних аналізів із місця кісткового дефекту.

Заміщення кісткового ушкодження виконували здебільшого одномоментно з заміною спосо-

бу металофіксації сумішшю КФКлК у комбінації з аутоспонгіозою. Для заповнення порожнинних дефектів критичних розмірів діафізарної частини кістки перевагу надавали використанню суміші гранул модифікованої наноструктурованої двофазної біоактивної кераміки й аутоспонгіозної тканини, що дозволяло досягти таких цілей: збільшення обсягу пластичного матеріалу, надання остеоіндуктивних властивостей біоактивній кераміці, відповідність термінів заміщення пластичного біокерамічного матеріалу кістковою тканиною термінам консолідації кінцівок.

Як пластичний біоматеріал для імплантації в порожнину індукованої мембрани використано пористі гранули з КФКлК, розміром 3–4 мм. Вона складалась із трьох біосумісних фаз: 65 мас. % гідроксиапатиту (ГАП), 30 мас. % β -трикальційфосфату (β -ТКФ), 5 мас. % α -трикальційфосфату (α -ТКФ). Завдяки різним кристалічним структурам три фази біоматеріалу мають різну розчинність. Під час контакту з фізіологічним середовищем невелика кількість більш розчинної фази α -ТКФ розчиняється швидше, збільшуючи нанопористість біоматеріалу. Стійкіша до розчинення фаза ГАП забезпечує каркас, який, поступово резорбуючись, тримає форму втраченого фрагмента кістки. Легування кремнієм сприяє створенню наноструктури (рис. 1), що надає остеоіндуктивні властивості біоматеріалу, крім того, кремній є важливим елементом сполучної і кісткової тканини, пришвидшує загоєння травмованих кісток, активізує стовбурові клітини, надає остеоіндуктивні властивості синтетичним матеріалам [3, 11, 13].

Із метою утримання форми пластичного матеріалу та можливості імпації, використовували полімерні та титанові сітки, як каркас ділянки пластики та каркасні сітки з біодеградуючого матеріалу полілактиду. У 4-х випадках застосовували адитивні технології — 3D-змодельовані та надруковані на 3D-принтері об'ємні форми пластичного матеріалу подібні до дефекту кістки, який мав співвідношення з металофіксаторами.

Для аналізу ступеня супутніх травматичних ушкоджень і забрудненості м'яких тканин під час вогнепальних поранень використовували класифікацію відкритих переломів R. В. Gustillo, з метою виявлення ступеня тяжкості ушкодження кісткової тканини — класифікацію АО, яка в більшості випадків спостережень у нашій клініці включала тип С для метафізарних і діафізарних ВПК, а також групу С3 для суглобів кінцівок.

Судинні та неврологічні ураження за ВПК оцінювали за класифікацією відкритих переломів АО.

У всіх пацієнтів під час госпіталізації та хірургічного втручання проводили бактеріологічний посів із ран і місця кісткового дефекту на флору та визначали її чутливість до антибіотиків.

Контроль хворих клінічно і рентгенологічно проводили через 1 та 3 міс., за відсутності ускладнень. Результати лікування аналізували в строки 6, 12 і 18 міс. із моменту виконання пластичних операцій на кістках. Підсумок оперативного лікування здійснювали за власною модифікованою 100 бальною шкалою що за принципами шкали Harris'a та Rowe враховує 4 критерії: больовий синдром, клінічна картина функціонального відновлення, рентгенологічні знімки та наявність чи відсутність інфекційних і трофічних ускладнень (табл.).

Результати

Методику тимчасового заповнення ран цементним спейсером РММА з гентаміцином застосовували 36 особам із кістковими дефектами та ризиком місцевих проявів септичного запалення.

За відсутності септичних проявів у ділянці ураження та нормалізації показників загальноклінічних аналізів, проводили другий етап планової кісткової пластики дефектів, ураховуючи розмір і локалізацію травми, стан м'якотканинних ушкоджень і трофіки кінцівки (рис. 2).

За критичних кісткових дефектів, використовуючи техніку Masquelet в сегментах з однією кісткою (плече, стегно) обирали переважно інтрамедулярний блокований остеосинтез с додатковою фіксацією накістковим металофіксатором (пластиною), або дві пластини. У сегментах із 2-ма кістками (передпліччя, великогомілкова кістка) під час фіксації кісткових уламків однієї кістки переважно застосовували накісткові металофіксатори — пластини.

На 2-му етапі заміни РММА спейсера на кістково-пластичну суміш в окремих випадках додатково використовували титанову сітку в 17 пацієнтів, біополімерну — 6 особам, каркасну сітку з біодеградуючого матеріалу викотовлену по формі дефекту з використанням 3D-принтеру — 2 пораненим (рис. 3).

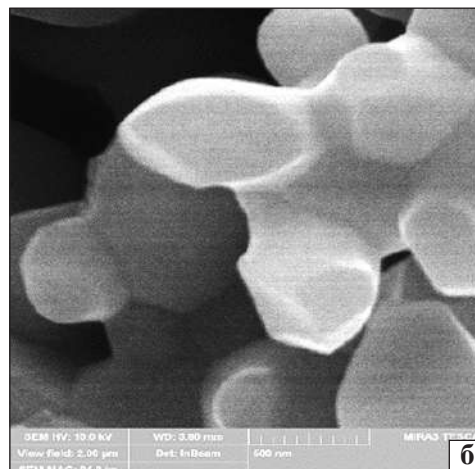
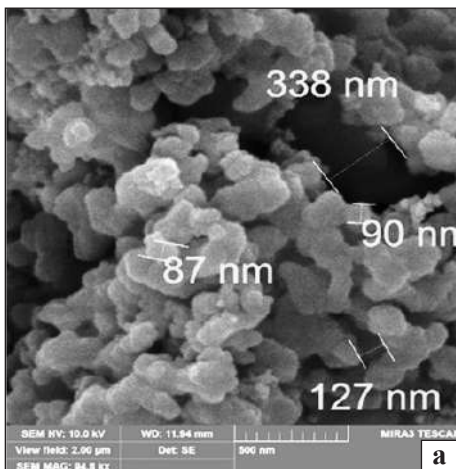


Рис. 1. Мікроструктура наноструктурованої біоактивної кераміки, модифікованої кремнієм (а), та звичайної пористої двофазної біоактивної кераміки (б), однакове збільшення

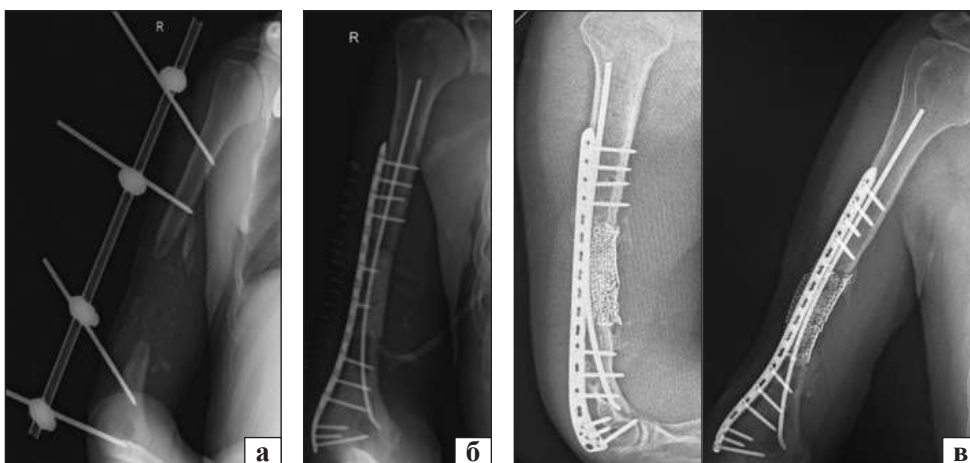


Рис. 2. Комбінована двоетапна кісткова пластика за методикою Masquelet (рентгенограми після некрсеквестрэктомії в АЗФ (а) та проведення 1-го етапу (конверсія металоостеосинтезу та заповнення дефекту РММА спейсером) (б) та 2-го з металофіксацією TEN накістковою пластиною та титановою сіткою, фіксуюча суміш аутоспонгіози та КФКЛК (в))

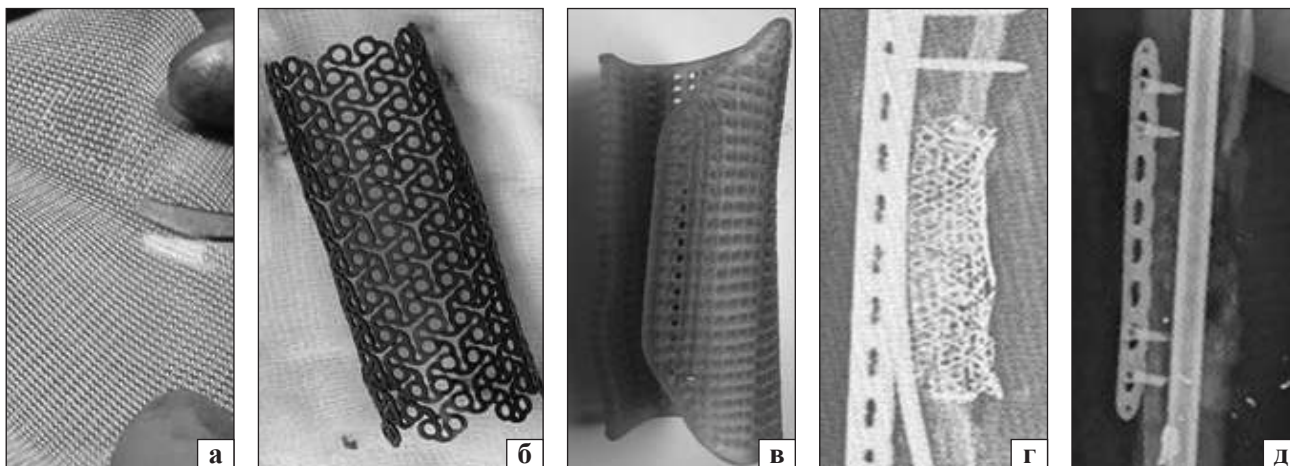


Рис. 3. Приклади використання різних типів сіток для формування суміші аутоспонгіози і КФКЛК (біополімерна сітка (а), титанова змодельована сітка (б), 3D-змодельована біодеградуєча сітка (в)), приклади вигляду сіток на рентген-контролі (рентген-контрастна титанова (г) та нерентген-контрастна біополімерна (д))

Таблиця

Модифікована 100 бальна шкала оцінювання результатів операції

Критерій	Результат			Критерій нарахування балів
	відмінний	задовільний	незадовільний	
Больовий синдром за шкалою ВАШ	до 2-х балів	до 5 балів	більше 5 балів	25–21 — відсутність болю; 20–11 — наявність болю під час рухів; 0–10 — біль у спокої
Клінічна оцінка: обсяг рухів у суміжних суглобах, вісьове навантаження (відновлення функції)	Обмеження до 20 % обсягу рухів у суміжних суглобах; вісьове навантаження повне; повне відновлення працездатності	Обмеження до 50 % обсягу рухів; вісьове навантаження до 40–50 % ваги тіла (хода з паличкою); часткове відновлення працездатності, соціалізація	Обмеження більше 50 % об'єму рухів; вісьове навантаження до 50 % ваги тіла (хода з милицями, пересування на візку); відсутність або незначне відновлення функції кінцівки що обмежує соціалізацію	25–21 — повне відновлення працездатності, обсягу рухів і вісьового навантаження; 20–15 — часткове відновлення працездатності, соціалізація, обмеження обсягу рухів у суміжних суглобах до 20–30 %, часткове обмеження навантаження; 0–14 — обмеження рухів, навантаження, соціалізація
Рентген ознака	Наявність ознак мозолеутворення й остеоінтеграції та перебудови трансплантата; відсутність ознак міграції або деформації металофіксаторів і трансплантата	Слабкі прояви ознак мозолеутворення; відсутність остеоінтеграції та перебудови трансплантата; наявність незначних ознак міграції або деформації металофіксаторів і трансплантата, які не потребують корекційного лікування	Відсутність ознак мозолеутворення й остеоінтеграції та перебудови трансплантата; наявність ознак міграції або деформації металофіксаторів та трансплантата, які потребують корекційного лікування	25–21 — наявність ознак утворення періостального мозолю й остеоінтеграції та перебудови трансплантата; 20–11 — відсутність ознак консолидації, наявність незначної деформації або міграції металофіксаторів і трансплантата; 0–10 — відсутність ознак консолидації, наявність значної деформації або міграції металофіксаторів
Наявність ускладнень	Відсутність інфекційних або місцевих трофічних ускладнень	Місцеві інфекційні або трофічні ускладнення, які нівелюються консервативним лікуванням або місцевими хірургічними маніпуляціями	Інфекційні або трофічні ускладнення, що потребують подальшого втручання	25 — відсутність ускладнень; 20–11 — місцеві незначні інфекційні або трофічні ускладнення; 0–10 — інфекційні або трофічні ускладнення, які потребують подальшого втручання
Загальна кількість балів	75–100	50–75	менше 50	—

У 9 хворих додатково матеріалів для формування пластичної суміші не застосовували, здебільшого це ті, яких оперували в 2022–2023 р. Пластичний матеріал розміщували в порожнині, котра формувалася й обмежувалась лише індукованою мембраною, але з досвіду, це призводило до часткової міграції пластичного матеріалу в навколишні м'які тканини, або під час виконання пластики не вдавалося відповідно зробити імпакцію суміші для надання їй більшої фізіологічної щільності.

В 2 випадках за потреби раннього вісьового навантаження під час заміщення критичного дефекту стегнової кістки застосовували адитивні технології, які полягали в 3D-проектванні, моделюванні і виготовленні виробів з КФКЛК, котрі використовували як пластичний матеріал для заміщення дефекту кістки на 2-му етапі лікування (рис. 4).

Контроль пацієнтів проводили через 1 та 3 міс., оцінювали больовий синдром за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ), об'єм рухів у суміжних суглобах і рентген ознаки стабільності металофіксаторів і відсутність деформацій чи міграцій з боку трансплантатів. Результати лікування вивчали в строки 6 міс. у всіх 36 осіб, через 12 міс. — у 23, а 18 міс. — у 17 пацієнтів, вони для поранених з ушкодженнями верхніх і нижніх кінцівок різняться.

Більшість хворих із критичними дефектами верхніх кінцівок під час контролю в 6 міс. показали відмінні клінічні результати, а з травмами нижніх кінцівок — задовільні, що відповідає середнім строкам консолідації ушкоджень кісток цієї локалізації та відновлення працездатності. Під час аналізу результатів лікування в 12 місячний термін після пластичних маніпуляцій відмінні показники із повним відновленням функції кінцівки отримані в 18 (78 %) пацієнтів, задовільні — у 4 (17 %) осіб, у 1 (5 %) результат був незадовільним, що потребувало подальших оперативних втручань. Для прикладу наводимо дані хворого з критичним дефектом плечової кістки, котрий проходив лікування й одужав в строк 6 міс. після пастичних маніпуляцій (рис. 5). Усереднений показник больового синдрому в контрольний строк 6 та 12 міс. за шкалою ВАШ у пацієнтів з відмінним результатом лікування склав 1,6 бала, в групі з задовільним — 2,4 бала, у особи з незадовільним результатом — 4,1. Рентгенологічне оцінювання консолідації проводилось за 3-ма критеріями: утворення кісткового мозолу, прояви ущільнення і перебудови трансплантата.

У всіх 36 пацієнтів у періоди 3, 6 і 12 міс. простежувалися ознаки утворення кісткового мозолу, стосовно ступеня перебудови трансплантата й ущільнення структури оцінювання суттєвих ознак можливо здійснити в строки більші 12 міс. (18, 24 міс. і більше), що потребує подальшого спостереження.

Ускладнення в післяопераційному періоді у вигляді місцевих септичних запальних процесів були в 7 пацієнтів, у 5 випадках носили характер місцевих проявів у ділянці післяопераційних рубців та нівелювалися після проведення хірургічних та антисептичних маніпуляцій. У 2 випадках виникла потреба у вторинній хірургічній обробці з використанням пульс-лаважу, промивної та ВАК систем.

Обговорення

В останній час збільшується кількість робіт щодо бойової травми кінцівок, особливо ВПК із дефектом кісткової тканини. Вона ушкоджує всі компоненти архітектури кінцівок, а саме: шкіру, м'які тканини, кісткові, судинні та нервові елементи, що вимагає проводити швидко та точно оцінювання з вибором методик лікування для оптимізації функціональних результатів.

За рахунок раннього заміщення дефектів тканин можна досягти істотного зниження ризику розвитку інфекційних ускладнень, збереження життєздатності кісткових уламків, сухожилків, суглобових хрящів, судин і нервів, а також оптимізації перебігу репаративних процесів, і як наслідок — кращих результатів загоєння та відновлення функції кінцівки [1, 6, 7].

Незважаючи на велику кількість літературних джерел цієї тематики, на сьогодні не існує загальноновизнаного алгоритму дій, не визначені чіткі критерії тактики, строків виконання маніпуляцій, вибору пластичних матеріалів і способів стабілізації уламків.

Власний досвід використання суміші аутопонгіози та КФКЛК у поєднанні зі стабільним зануреним остеосинтезом (проводиться в два етапи методом конверсії зі зовнішнього на занурений) дає можливість отримати позитивний результат у більшості клінічних випадків лікування критичних післятравматичних діафізарних кісткових дефектів.

Використання таких сучасних технологій як 3D-моделювання за допомогою КТ кісткового дефекту пацієнтів разом із можливістю застосування біоактивних біорезорбуючих матеріалів, спрощує технічні складнощі, котрі виникають під час проведення реконструктивно-відновлювальних операцій.

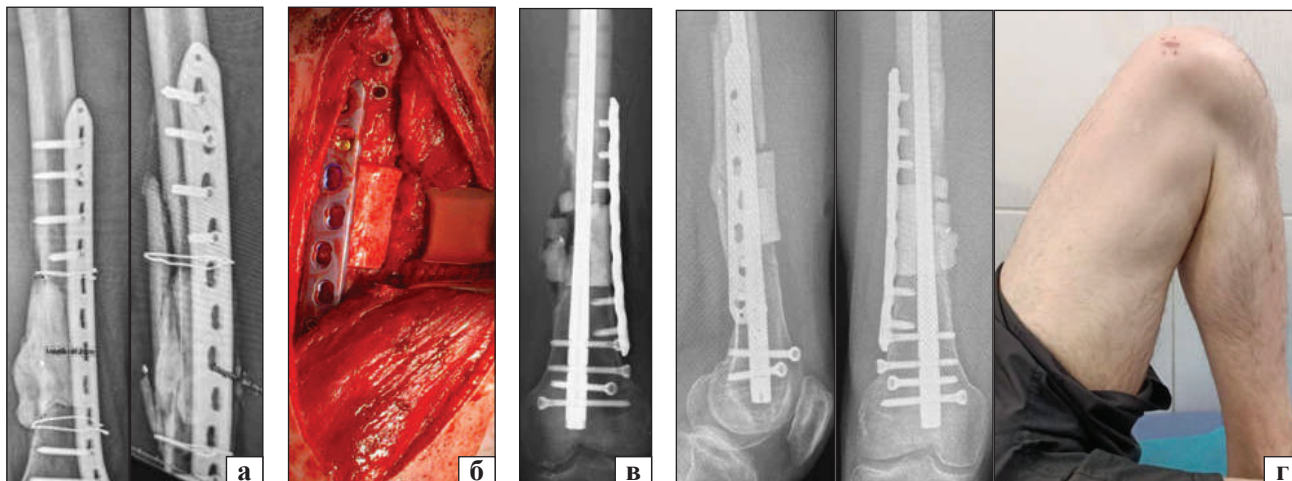


Рис. 4. Приклад використання 3D-модельовання за умов використання виробів із КФКЛК. Рентген пацієнта з дефектом діафіза стегнової кістки після МОС пластиною та заміщення дефекту РММА спейсером (а), під час операції заміщення дефекту 3D-модельованим імплантатом КФКЛК (б), в після операційному періоді рентген контроль на наступний день після операції (в) та через 4 міс., фото прооперованої кінцівки після відновлення функції (г)

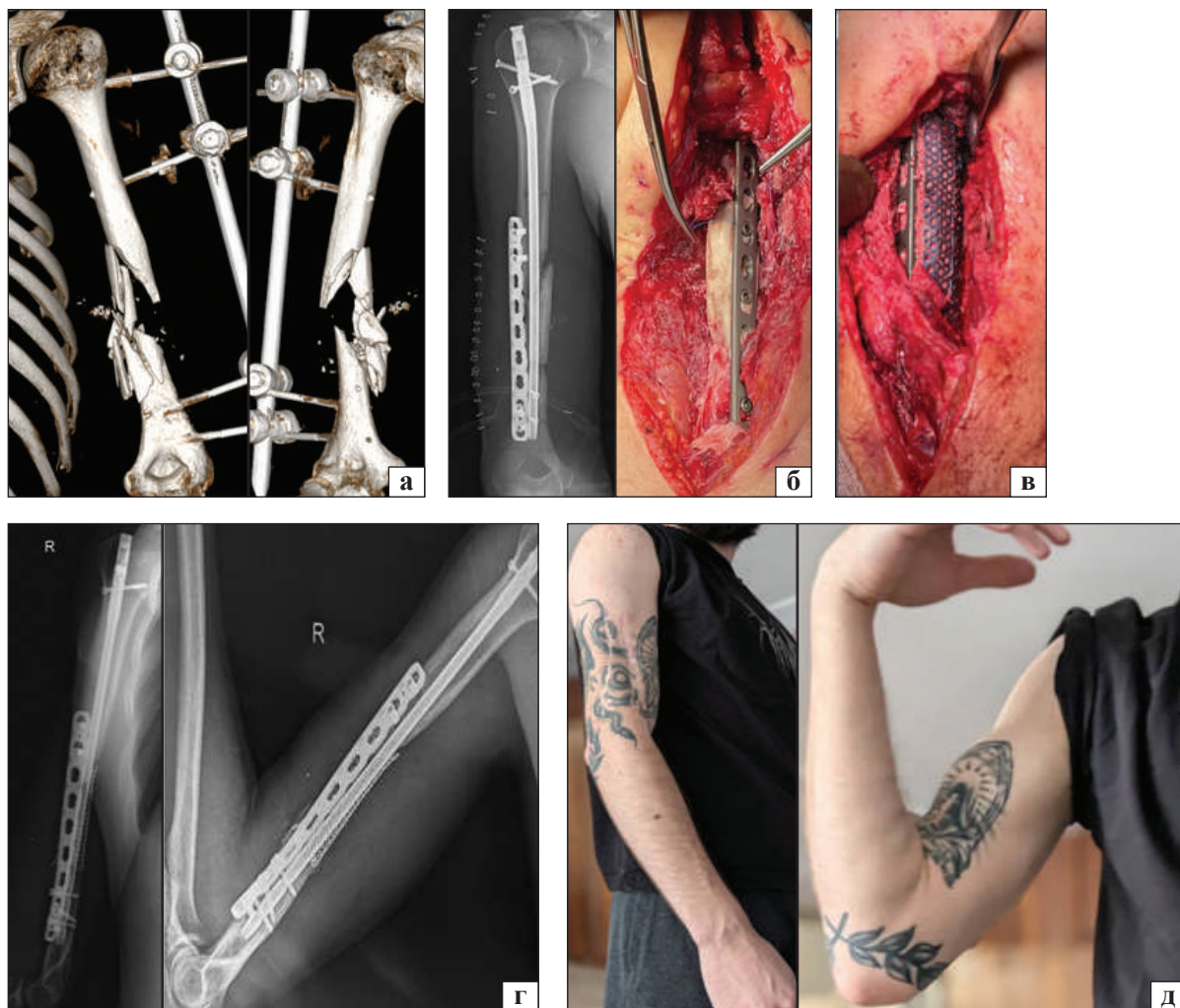


Рис. 5. Приклад лікування пацієнта за методикою Masquelet з критичним дефектом діафіза плечової кістки на КТ (а), після конверсії зовнішнього металоостеосинтезу на занурений на 1-му етапі зі заміщенням дефекту РММА спейсером (б) і на 2-му — пластиною сумішню аутоспонгії і КФКЛК із використанням титанової сітки на інтраопераційних фото (в) і рентген-контролі після операції (г) та фото результату лікування з обсягом рухів і відновленням функції та працездатності через 6 міс. (д)

Так використання 3D-сіток із біодеградуючого пластику допомагає формувати й утримувати потрібний обсяг пластичної суміші для заповнення критичного кісткового дефекту необхідної форми. А виготовлення 3D-моделі імплантата з КФКЛК надає можливість не лише застосування пластичного матеріалу відповідно до форми і розмірів дефекту, а й більшу міжуламкову стабільність та може за рахунок корекції щільності матеріалу корегувати терміни біодеградації відповідно до фізіологічних строків кісткової перебудови. Ураховуючи більші строки перебудови кістковопластичної суміші, як порівняти зі середнім терміном зрощення переломів цієї локалізації, для їхнього оцінювання потрібні більш тривалі спостереження у віддаленому періоді (24 та 36 міс).

Висновки

Проаналізувавши результати лікування, вважаємо, що використання суміші КФКЛК і аутоспонгіози під час двоетапного заміщення критичних діафізарних кісткових дефектів має позитивний ефект в більшості клінічних випадків.

Рациональним під час лікування поранених із ВПК і критичних розмірів кісткових дефектів є поєднання сучасних ортопедо-травматологічних методик і новітніх технологій. 3D-моделювання та використання біодеградуючих матеріалів розширюють діапазон можливостей лікаря для проведення кістковопластичних маніпуляцій.

Рекомендована тактика вибору методик і матеріалів для заміщення післятравматичних критичних кісткових дефектів внаслідок бойової травми в поєднанні зі стабільним металоостеосинтезом дала можливість отримати позитивні результати лікування більш ніж у 90 % пацієнтів, що свідчить про можливість її використання в травматологічній практиці.

Конфлікт інтересів. Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

Перспективи подальших досліджень. Використання сучасних адитивних технологій у сукупності з можливістю застосування біоактивних біорезорбуючих матеріалів, спрощує технічні складнощі, котрі виникають під час проведення реконструктивно-відновлювальних операцій. Проте оцінку рентгенологічних ознак утворення кісткового мозолу та біорезорбції і перебудови трансплантата можливо простежити в строки більш ніж 12 місяців (а саме в 18, 24 і більше), що потребує подальшого спостереження, яке і планується в наступні періоди з вивченням довгострокових результатів лікування.

Інформація про фінансування. Ця публікація не була, не є і не буде предметом комерційної зацікавленості в будь-якій формі.

Внесок авторів. Шмагой В. Л. — провів клінічні дослідження, робив наукову та статистичну обробку матеріалів; Юрженко М. В. — виконання практичної роботи з адитивними технологіями, написання статті; Ульянович Н. В., Коломієць В. В., Фірстов С. О. — підбір і забезпечення КФК, надання науково-технічної інформації.

Список літератури

1. Hrytsai, M., Kolov, H., Sabadosh, V., Vyderko, R., Polovyi, A., & Hutsailiuk, V. (2024). Main surgical methods of critical tibial bone defects replacement (Literature review). *Terra orthopaedica*, (1(120)), 42–49. <https://doi.org/10.37647/2786-7595-2024-120-1-42-49>
2. Hrytsai, M., Kolov, H., Sabadosh, V., Vyderko, R., Polovyi, A., & Hutsailiuk, V. (2024). Main surgical methods of critical tibial bone defects replacement (Literature review). Part II. *Terra orthopaedica*, (2(121)), 45–53. <https://doi.org/10.37647/2786-7595-2024-121-2-45-53>
3. Rublenko, M., Chemerovsky, V., Vlasenko, V., & Ulyanchich, N. (2018). Evaluation of osteointegrative and osteoinductive properties of silicon doped ceramics in a model of rabbit's femur fractures. *Naukovij visnik veterinarnoi medicini*, (2 (144)), 44–53. <https://doi.org/10.33245/2310-4902-2018-144-2-44-53>
4. Strafun, S., Kurinnyi, I., Borzykh, N., Tsybaliuk, Y., & Shypunov, V. (2021). Tactics of surgical treatment of wounded with gunshot injuries of the upper limb in modern conditions. *Visnyk ortopedii travmatologii protezuvannia*, (2(109)), 10–17. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2021-109-2-10-17>
5. Tsybalyuka, V. I. (2020). *Treatment of the wounded with combat injuries of the limbs (based on the experience of the ATO/JPO)*. PJSC «Printing and Publishing Complex «Desna», Chernihiv. (In Ukrainian)
6. Khomenko, I. P., Korol, S. O., Khalik, S. V., Shapovalov, V. Y., Yenin, R. V., Herasimenko, O. S., & Tertyshnyi, S. V. (2021). Clinical and epidemiological analysis of the structure of combat surgical injury during antiterrorist operation / Joint forces operation. *Ukrainian journal of military medicine*, 2(2), 5–13. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2021.2\(2\)-005](https://doi.org/10.46847/ujmm.2021.2(2)-005)
7. Andrzejowski, P., & Giannoudis, P. V. (2019). The 'diamond concept' for long bone non-union management. *Journal of orthopaedics and traumatology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s10195-019-0528-0>
8. Gustilo, R. B., Mendoza, R. M., & Williams, D. N. (1984). Problems in the management of type III (Severe) open fractures. *The journal of trauma: injury, infection, and critical care*, 24(8), 742–746. <https://doi.org/10.1097/00005373-198408000-00009>
9. Müller, M. E., Nazarian, S., Koch, P., & Schatzker, J. (2012). *The comprehensive classification of fractures of long bones*. Springer Science & Business Media.
10. Mathieu, L., Mourtialon, R., Durand, M., De Rousiers, A., De l'Escalopier, N., & Collombet, J. (2022). Masquelet technique in military practice: Specificities and future directions for combat-related bone defect reconstruction. *Military Medical Research*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40779-022-00411-1>
11. Pidgaietskyi, V., Ulianchych, N., Kolomiets, V., Rublenko, M., & Andriiets, V. (2023). Osseointegration properties of domestic bioactive calcium phosphate ceramics doped with silicon. *Polish journal of medical physics and engineering*, 29(2), 113–129. <https://doi.org/10.2478/pjmpe-2023-0013>
12. Wong, T. M., Lau, T. W., Li, X., Fang, C., Yeung, K., & Leung, F. (2014). Masquelet technique for treatment of posttraumatic bone defects. *The scientific world journal*, 2014, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2014/710302>

13. Tavafoghi, M., Kinsella, J. M., Gamys, C. G., Gosselin, M., & Zhao, Y. F. (2018). Silicon-doped hydroxyapatite prepared by a thermal technique for hard tissue engineering applications. *Ceramics international*, 44(15), 17612–17622. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.071>.
14. Miri, Z., Haugen, H. J., Loca, D., Rossi, F., Perale, G., Moghanian, A., & Ma, Q. (2024). Review on the strategies to improve the mechanical strength of highly porous bone bioceramic scaffolds. *Journal of the European ceramic society*, 44(1), 23–42. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2023.09.003>
15. Wang, J., Yin, Q., Gu, S., Wu, Y., & Rui, Y. (2019). Induced membrane technique in the treatment of infectious bone defect: A clinical analysis. *Orthopaedics & traumatology: surgery & research*, 105(3), 535–539. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.01.007>

Стаття надійшла до редакції 24.01.2025	Отримано після рецензування 26.02.2025	Прийнято до друку 03.03.2025
---	---	---------------------------------

OUR EXPERIENCE IN USING MODIFIED BIOACTIVE CERAMICS FOR THE RECONSTRUCTION OF CRITICAL POST-TRAUMATIC BONE DEFECTS

V. L. Shmagoy ¹, N. V. Ulyanchich ², M. V. Iurzenko ³, V. V. Kolomiets ², S. O. Firstov ²

¹Medical Center «Dobrobut-Polyclinic», Kyiv, Ukraine

²Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

³E. O. Paton Electric Welding Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

✉ Vasyly Shmaho, PhD: shmagoiv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2635-4125>

✉ Nataliia Ulianchych, Candidate of Technical Sciences: ulnata@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-8806-0280>

✉ Maksym Iurzenko, DEngSci., Prof.: 4chewip@gmail.com

✉ Volodymyr Kolomiets: vova270192@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2322-7091>

✉ Sergiy Firstov: sfirstov@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-9676-722X>