

UDC: 616.718.1-001.5-089.844:616.71-018.1:539.4
<https://doi.org/10.32345/SUPPLEMENT.2.2025.302-306>

Received: May 08, 2025
Accepted: June 10, 2025

Морфологічна та рентгенологічна характеристика кісткового регенерату в умовах застосування вуглець-вуглецевого композитного матеріалу

Павло Богданов

Кафедра анатомії людини, оперативної хірургії та топографічної анатомії,
Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, м. Запоріжжя, Україна.

Corresponding Author:

Pavlo Bohdanov

E-mail: Pavel_bogdanov@ukr.net

Анотація: Важливим етапом в хірургічному лікуванні переломів кісток, що безпосередньо може впливати на темпи та результати репаративної регенерації є обрання способу фіксації з урахуванням біомеханічних властивостей як кістки так і фіксуючого матеріалу. Метою дослідження було встановлення морфологічних та рентгенологічних особливостей регенерації перелому великогомілкової кістки щурів за умов використання вуглець-вуглецевого композитного матеріалу. В роботі досліджено великогомілкову кістку 12 білих статевозрілих лабораторних щурів самців лінії «Вістар». Тваринам моделювали простий неповний перелом великогомілкової кістки задньої лівої кінцівки. Всіх щурів було поділено на 2 групи по шість в кожній. Перша група (контрольна) - яким після моделювання перелому не виконували ніякої фіксації. В другу групу входили експериментальні тварини, яким після моделювання перелому виконували інтрамедулярну фіксацію композитним вуглець-вуглецевим матеріалом. Виготовлені за стандартними гістологічними методиками зрізи забарвлювали гематоксиліном та еозином для проведення оглядової мікроскопії. Рентгенологічне дослідження проводили використовуючи апарат X-MIND Unity (Італія). В результаті дослідження встановлено, що у тварин з модельованим неповним простим поперечним діафізарним переломом великогомілкової кістки та інтрамедулярною фіксацією імплантами з композитного вуглець-вуглецевого матеріалу в кістковому регенераті прискорюються темпи утворення грануляційної та фіброваскулярної тканини, клітини більш щільно, порівняно з контролем, заповнюють міжуламкову зону регенерату.

Ключові слова: кістковий регенерат, остеосинтез, вуглецеві сполуки, перелом великогомілкової кістки, композитний матеріал.

Вступ

Одне з провідних місць в структурі загальної захворюваності, що призводить до тимчасової втрати працездатності, або навіть інвалідизації, займають хвороби та травми кістково-рухового апарату. Так за даними GBD 2019 Fracture Collaborators в 2019 році в світі було зареєстровано 178 мільйонів нових переломів кісток [1]. За даними V. K. Sokol в структурі переломів довгих кісток нижніх кінцівок в результаті ДТП найчастіше спостерігається травма кісток гомілки 37,9 % [2].

Існує низка методів хірургічного лікування захворювань і травм кістково-рухового апарату кожен з яких має свої переваги та недоліки. Інтрамедулярна

фіксація є розповсюдженим методом в лікуванні переломів кісток та має позитивний вплив на загоєння переломів. Важливим етапом в хірургічному лікуванні переломів, що безпосередньо впливає на темпи та результати загоєння є обрання способу фіксації з урахуванням біомеханічних властивостей як кістки так і фіксуючого матеріалу [3]. Класичні матеріали, які застосовуються для фіксації кісткових уламків - це медична іржостійка сталь та титан. За рахунок своїх фізико-механічних властивостей, які перевищують міцність кортикального шару трубчастих кісток та призводять до ефекту «екранування напруги» в зоні перелому, що в свою чергу негативно впливає на процеси репаративної регенерації кістки та сповільнює її

строки. Не дивлячись на великий вибір матеріалів для фіксації та заміщення кісток що існують на сьогодні науковці різних галузей продовжують пошук, розробку та вдосконалення нових матеріалів [4,5].

Мета

Мета дослідження: встановити морфологічні та рентгенологічні особливості регенерації перелому великогомілкової кістки щурів з інтрамедулярною фіксацією вуглець-вуглецевим композитним матеріалом.

Матеріали і методи

В роботі досліджено великогомілкову кістку 12 білих статевозрілих лабораторних щурів самців лінії «Вістар». Тварин утримували в умовах віварію НН-МЛЦ з віварієм ЗДМФУ. На всіх етапах дослідження при роботі з тваринами дотримувались Директиви Європейського Парламенту з захисту тварин 2010/63/ЄС, Гельсінської Декларації та Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» № 3447-IV. В умовах експериментальної операційної центру, під загальним знеболенням з використанням тіопенату в дозуванні 30 мг/кг внутрішньоочеревинно, тваринам моделювали простий неповний (A2 тип) перелом великогомілкової кістки задньої лівої кінцівки [6]. Умовно тварини були поділені на 2 групи по шість в кожній. Першу групу включали 6 контрольних тварин, яким після моделювання перелому не виконували ніякої фіксації. Данні тварини використовувались в якості контролю. В другу групу (6 щурів) входили експериментальні тварини, яким після моделювання перелому в кістково-мозкову порожнину через окремий отвір в проекції горбистості великогомілкової кістки вводили стрижень з композитного матеріалу [7]. В якості імпланту використовували вуглець-вуглецевий композитний матеріал (ВВКМ) виробництва АТ «Мотор Січ» (УУКМ ТУ У 33.1-13312223-004:2007). Всім тваринам виконували рентгенологічний контроль використовуючи апарат X-MIND Unity (Італія) під час оперативного втручання та в день виведення з експерименту. В післяопераційному періоді додаткове лікування не призначалось, рану обробляли розчином 3% йоду. Тварин виводили з експерименту на 7 добу після операції шляхом передозування тіопенатом. Вилучену задню ліву кінцівку фіксували у 10% розчині нейтрального забуференого формаліну протягом 72 годин з подальшою декальцинацією у 5% розчині мурашиної кислоти протягом 3-5 діб виконуючи контроль ступеня декальцинації методом проколювання голкою. Вирізаний препарат зневоднювали у висхідній батареї спиртів від 50% до 100% з подальшою заливкою у парафін. Серійні зрізи товщиною 5-6 мкм виготовляли з використанням ротаційного мікротома НМ 340е (Thermo Fisher Scientific). Для оглядової мікроскопії зрізи забарвлювали гематоксилином та еозинном за стандартною методикою. Дослідження проводили на

мікроскопі Primo Star (Zeiss) оснащеним цифровою камерою AxioCam ERc 5s та програмним забезпеченням ZEN 2.6 (blue edition).

Результати

Післяопераційний період в контрольній та експериментальній групах протікав без ускладнень. Додатково в післяопераційному періоді лікування не призначалось, тваринам виконували лише обробку рани спиртовим розчином йоду.

Через 7 діб після операції в контрольній групі тварин на рентгенограмі в бічній проекції в проксимальній третині діяфіза лівої великогомілкової кістки спостерігається ділянка зниженої кісткової щільності. Лінія перелому має чіткі нерівні контури, розташована поперечно відносно до поздовжньої вісі кістки, досягаючи кортикального шару задньої поверхні кістки. На передній поверхні є рентгенологічні ознаки фрагментації кістки без ознак зміщення. На зовнішній поверхні уламків спостерігаються слабоконтрастні періостальні нашарування рис.1.

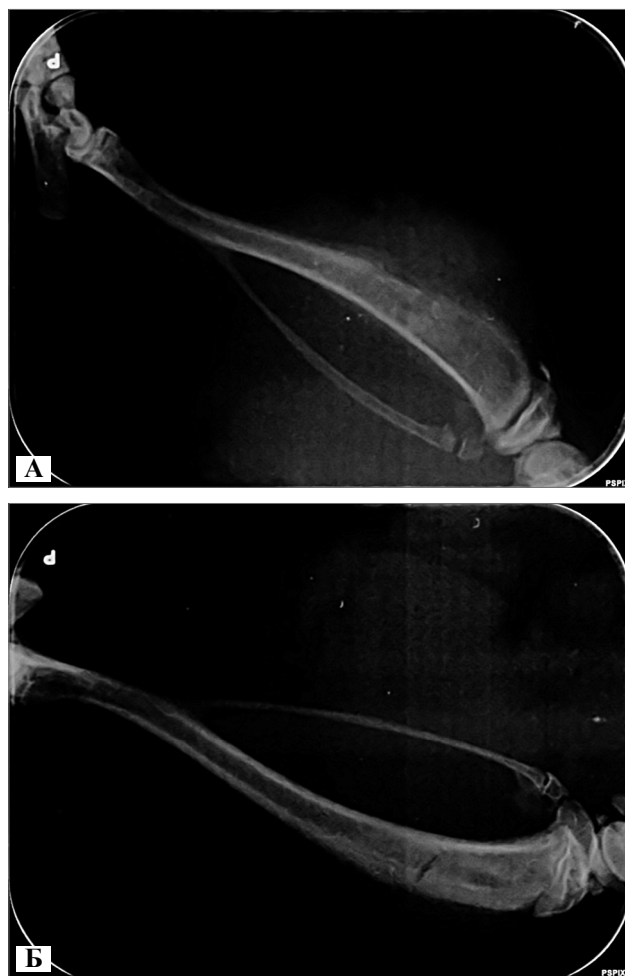


Рис. 1. Рентгенограма великогомілкової кістки задньої лівої кінцівки щура 7 доба спостереження (а – контрольна група, б – експериментальна група)

В групі експериментальних тварин з інтрамедулярною фіксацією ВВКМ на рентгенограмі в бічній проекції в проксимальній третині лівої великогомілкової кістки лінійний кістковий дефект, що займає три чверті поперечника кістки та розташований в поперечному напрямку відносно до поздовжньої вісі кінцівки. Краї кісткових уламків мають чіткі контури без ознак фрагментації та зміщення. Відмічається потовщення кортикальної пластинки в передній частині кістки. Імплант рентгенологічно не контрастується.

При гістологічному дослідженні у тварин в контрольній групі регенерат здебільшого представлений нейтрофілами, лімфоцитами, фібробластами та макрофагами, які заповнюють міжуламкову зону формуючи грануляційну та фіброваскулярну тканини. На уламковій поверхні кісток також виявляються остеокласти. Рис. 2.

Назовні окістя в місці формування періостальної мозолі виявляються хондробласти та хондроцити різних типів. Рис. 3.

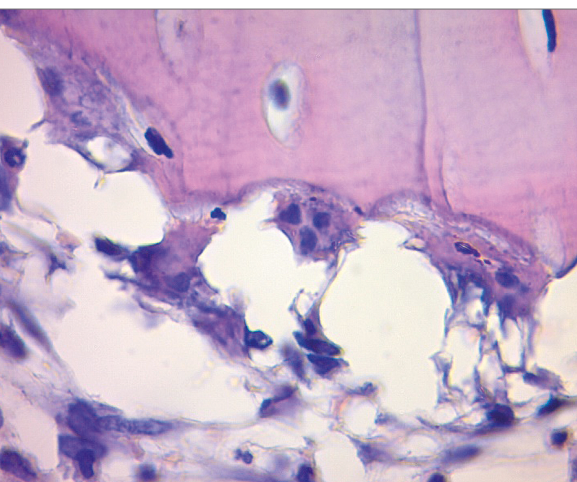
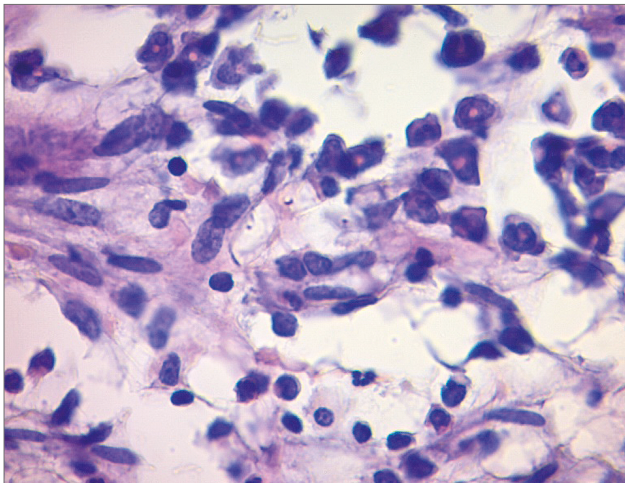


Рис. 2. Клітини регенерату великогомілкової кістки контрольна група. Збільш. X1000. Фарбування гематоксилін і еозин.

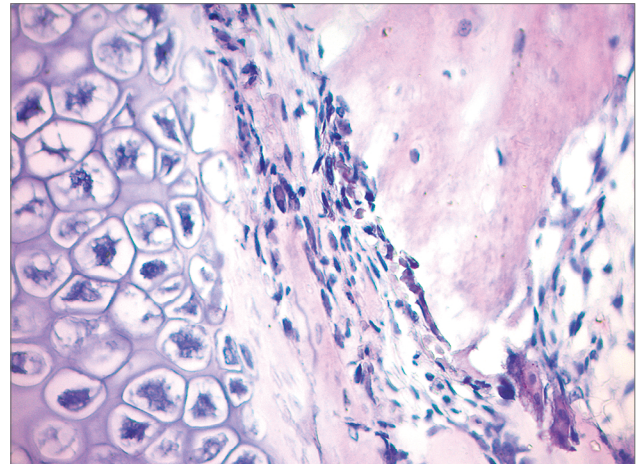


Рис. 3. Клітини регенерату великогомілкової кістки контрольна група. Збільш. X400. Фарбування гематоксилін і еозин.

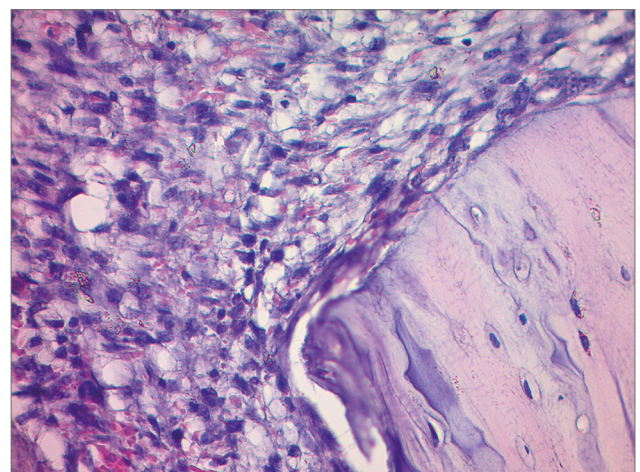
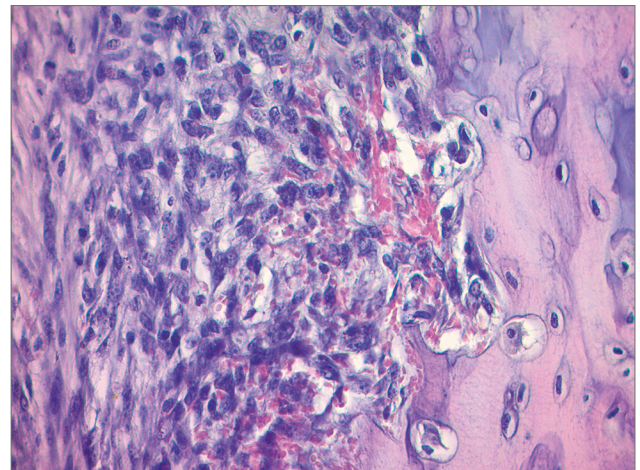


Рис. 4. Клітини регенерату великогомілкової кістки експериментальна група. Збільш. X400. Фарбування гематоксилін і еозин.

В експериментальній групі тварин у порівнянні з контролем на 7 добу спостереження міжкістковий ре-

генерат представлений більш вираженим утворенням грануляційної та фіброваскулярної тканин. Клітини переважно представлені фібробластами, ендотеліоцитами новоутворених капілярів. Звертає увагу більш виражена гематома на периферії регенерату в ділянці формування періостальної мозолі. Між клітинами фібробластичного ряду та в судинах багато еритроцитів. Хонроїдний компонент в регенераті відсутній. Клітини більш щільно розташовані та заповнюють міжуламкову зону регенерату. Рис. 4.

Обговорення та висновки

Таким чином в результаті проведеного дослідження встановлено, що у щурів з модельованим неповним простим поперечним діафізарним переломом (типу А2) великогомілкової кістки та інтрамедулярною фіксацією імплантатами з композитного вуглець-вуглецевого матеріалу в кістковому регенераті прискорюються темпи утворення грануляційної та фіброваскулярної тканини, клітини більш щільно, порівняно з контролем, заповнюють міжуламкову зону регенерату. На рентгенограмі краї кісткових уламків мають чіткі контури без ознак фрагментації та зміщення. Позитивний вплив на процеси репаративного остеогенезу також спостерігаються в дослідженнях інших авторів, які використовували композитні матеріали на основі вуглецю при хірургічному лікуванні переломів [8-10].

В подальшому планується продовжити вивчення особливостей регенерації, біоінтеграції та місцевої

запальної реакції тканин у щурів з модельованим переломом великогомілкової кістки у щурів за умов використання імплантів на основі композитного вуглець-вуглецевого матеріалу.

Фінансування

Данна робота є фрагментом науково-дослідної роботи кафедри анатомії людини, оперативної хірургії та топографічної анатомії ЗДМФУ «Морфологічні особливості перебудови кісток в умовах їх полісегментарного ушкодження та хірургічної корекції», номер державна реєстрація №0120U103164, та виконується в рамках договору про спільну науково-дослідну діяльність між АТ «Мотор Січ» та ЗДМУ № 6125/19-к (УЕУ и ГПА) від 17 квітня 2019 року.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують відсутність конфліктів інтересів.

Згода на публікацію

Всі автори ознайомлені з текстом рукопису та надали згоду на його публікацію

ORCID ID:

[0000-0002-1533-6370](https://orcid.org/0000-0002-1533-6370) (A, B, C, D, E, F)Bohdanov Pavlo

A – Work concept and design, B – Data collection and analysis, C – Responsibility for statistical analysis, D – Writing the article, E – Critical review, F – Final approval of the article

ЛІТЕРАТУРА

1. Wu, Ai-Min et al. Global, regional, and national burden of bone fractures in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Healthy Longevity*, 2021; Volume 2(9): e580 - e592. doi:10.1016/S2666-7568(21)00172-0.
2. Sokol VK. Structure of long bone fractures of lower limbs at a car injury. *Ортопедия, травматология и протезирование*. 2020;2:33-39. doi:10.15674/0030-59872020233-39.
3. Шайко-Шайковський О, Дудко О, Кривоносов В, Яким'юк Д. Біомеханічні аспекти накісткового остеосинтезу діафізарних переломів. *medphys [Internet]*. 2025 Jan. 26 [cited 2025 May 18];1(1):226-33. Available from: <https://medphys.knu.ua/article/view/3425>
4. Kong X, Zhang X, Wang Y, Zhang B. Current Advances of Antibacterial Biomaterials for Bone Regeneration. *Adv. Mater. Interfaces [Internet]*. 2025 [cited 2025 Feb 8]; 2400960. Available from: <https://doi.org/10.1002/admi.202400960>
5. Song P, Zhou D, Wang F, et al. Programmable biomaterials for bone regeneration, *Materials Today Bio*, [Internet]. 2024 [cited 2024 Oct 9];29:101296, Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.101296>.
6. Zhang H. et al. Design of internal fixation implants for fracture: A review. *Journal of Orthopedic Translation*. 2025;50:306-332. doi:10.1016/j.jot.2024.09.012.
7. Богданов ПВ. Розробка способу експериментального моделювання переломів трубчастих кісток у щурів. *Morphologia*. 2024;18(3):145-148. doi:10.26641/1997-9665.2024.3.145-148.
8. Li CS, Vannabouathong C, Sprague S, Bhandari M. The Use of Carbon-Fiber-Reinforced (CFR) PEEK Material in Orthopedic Implants: A Systematic Review. *Clinical Medicine Insights*. [Internet] 2015;8:33–45. doi:10.4137/CMAMD.S20354.

9. Zhao F, Zhang L, et al. Mechanically strong and bioactive carbon fiber-SiC nanowire-hydroxyapatite-pyrolytic carbon composites for bone implant application. *Ceramics International*. [Internet] 2021;47(3):3389–3400. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.184>

10. Чорний В. Carbon composite materials as implants for orthopedics and traumatology. (literature review). *SWJ* [Internet]. 2023Nov.30 [cited 2025May18];2(22-02):77-83. Available from: <https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj22-02-040>

Morphological and radiological characteristics of bone regenerate under conditions of the use of carbon-carbon composite material.

Pavlo Bohdanov

Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia, Ukraine

Corresponding Author:

Pavlo Bohdanov

E-mail: Pavel_bogdanov@ukr.net

Abstract: An important step in the surgical treatment of bone fractures, which can directly affect the rate and results of reparative regeneration, is the choice of fixation method, taking into account the biomechanical properties of both the bone and the fixation material. The aim of the study was to determine the morphological and radiological features of the regeneration of rat tibia fracture using a carbon-carbon composite material. The tibia of 12 white mature male laboratory rats of the Wistar line was studied. The animals were modeled with a simple incomplete fracture of the tibia of the posterior left limb. All rats were divided into 2 groups of six in each. The first group (control) - which did not undergo any fixation after modeling the fracture. The second group consisted of experimental animals that underwent intramedullary fixation with a carbon-carbon composite material after fracture modeling. Sections made according to standard histological methods were stained with hematoxylin and eosin for examination microscopy. X-ray examination was performed using an X-MIND Unity apparatus (Italy). The study found that in animals with modeled incomplete simple transverse diaphysis fracture of the tibia and intramedullary fixation with implants made of composite.

Key words: [Carbon Compounds](#), [Tibial Fractures](#), [Biocompatible Materials](#), [Fracture Fixation](#), [Bone Regeneration](#)



Copyright: © 2025 by the authors;
licensee USMYJ, Kyiv, Ukraine.

This article is an open access
article distributed under the terms

and conditions of the Creative Commons Attribution License
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).