



Травма

www.mif-ua.com

25
років

Том 26, № 6, 2025

ЦЕНТР ЛІКУВАННЯ СКОЛІОЗУ



AKSIMED
КЛІНІКА СУЧАСНОЇ НЕВРОЛОГІЇ

(044) 390 0055
AKSIMED.UA

Ліцензія МОЗ України: серія АГ № 599054 від 21.11.2011 р.

САМОЛІКУВАННЯ МОЖЕ БУТИ ШКІДЛИВИМ ДЛЯ ВАШОГО ЗДОРОВ'Я

Міністерство охорони здоров'я України
Донецький національний медичний університет
Науково-дослідний інститут травматології та ортопедії
Асоціація ортопедів-травматологів України

Ministry of Health Service of Ukraine
Donetsk National Medical University
Research and Development Institute of Traumatology and Orthopedics
Association of Traumatologist and Orthopedists of Ukraine

Травма

TRAUMA

Travma

Спеціалізований рецензований науково-практичний журнал
Заснований у січні 2000 року
Періодичність виходу 6 разів на рік

Том 26, № 6, 2025

Specialized reviewed practical scientific journal
Founded in January 2000
Periodicity 6 numbers per year

Volume 26, № 6, 2025

Включений в наукометричні і спеціалізовані бази даних

Scopus,

НБУ ім. В.І. Вернадського, «Україніка наукова», «Наукова періодика України»,
Ulrichsweb Global Serials Directory, CrossRef, WorldCat, Google Scholar, ICMJE, SHERPA/RoMEO, BASE,
NLM-catalog, NLM-Locator Plus, EBSCO, OUCI



Травма

Travma

Спеціалізований рецензований
науково-практичний журнал

Том 26, № 6, 2025

ISSN 1608-1706 (print),
ISSN 2307-1397 (online)



Засновник журналу:
Донецький національний медичний
університет

Адреса редакції:
E-mail: medredactor.vdz@gmail.com
(Тема: До редакції журналу «Травма»)
Телефон: +38 (067) 325-10-26
www.mif-ua.com, https://trauma-journal.com

Електронні адреси для звертань
З питань публікації статей
fedorklimovitskiy@gmail.com
medredactor.vdz@gmail.com

З питань розміщення реклами
та інформації про лікарські засоби
v_iliyna@ukr.net

Журнал внесено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук. Наказ МОН України від 26.11.2020 № 1471. Категорія Б.

Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою Донецького національного медичного університету, протокол № 2 від 27.02.2025 р.

Реєстрація: ідентифікатор медіа R30-05649. Рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення № 3279 від 05.12.2024. Адреса, за якою здійснюється редакційний контроль: Україна, м. Кропивницький, вул. Ю. Коваленка, буд. 4а

Українською та англійською мовами

Формат: 60x84/8. Ум. друк. арк. 12,09.
Тираж 8000 прим. Зам. 2025-trauma-129.

Видавець Заславський О.Ю.
zaslavsky@i.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2128 від 13.05.2005

Друк: ТОВ «Ландпрес»

Головний редактор

Климовицький Федір Володимирович
(Лиман, Україна)

Заступник головного редактора

Чорний Володимир Сергійович
(Київ, Україна)

Відповідальний секретар

Гузовська М.Д. (Краматорськ, Україна)

Редакційна колегія

Бондаренко С.Є. (Харків, Україна),
Бур'янов О.А. (Київ, Україна),
Головач І.Ю. (Київ, Україна),
Зазірний І.М. (Київ, Україна),
Страфун С.С. (Київ, Україна),
Тяжелов О.А. (Харків, Україна),
Філіпенко В.А. (Харків, Україна),
Чернишова О.Є. (Краматорськ, Україна),
Hagen Schmal (Фрайбург-ім-Брайсгау,
Німеччина),
Robert Smigielski (Варшава, Польща),
Francesco Benazzo (Павія, Італія)

Редакційна рада

Анкін М.Л. (Київ, Україна),
Головаха М.Л. (Запоріжжя, Україна),
Гур'єв С.О. (Київ, Україна),
Климовицький Р.В. (Лиман, Україна),
Король С.О. (Київ, Україна),
Левицький А.Ф. (Київ, Україна),
Піонтковський В.К. (Рівне, Україна),
Сулима В.С. (Івано-Франківськ, Україна),
Сухін Ю.В. (Одеса, Україна),
Філь А.Ю. (Львів, Україна),
Ярмолюк Ю.О. (Київ, Україна)

Редакція не завжди поділяє думку автора публікації. Відповідальність за вірогідність фактів, власних імен та іншої інформації, використаної в публікації, несе автор. Передрук та інше відтворення в якій-небудь формі в цілому або частково статей, ілюстрацій або інших матеріалів дозволені тільки при попередній письмовій згоді редакції та з обов'язковим посиланням на джерело. Усі права захищені.

© Донецький національний медичний університет, 2025
© НДІ травматології та ортопедії Донецького національного медичного університету, 2025
© Заславський О.Ю., 2025

Травма

Travma

Specialized reviewed
practical scientific journal

Volume 26, № 6, 2025

ISSN 1608-1706 (print),
ISSN 2307-1397 (online)



Founder:
**Donetsk National Medical
University**

Editorial office address:
E-mail: medredactor.vdz@gmail.com
(Subject: Editorial board of the «Trauma» Journal)
Tel.: +38 (067) 325-10-26
www.mif-ua.com, <https://trauma-journal.com>

Correspondence addresses
Editorial office address
fedorklimovitskiy@gmail.com
medredactor.vdz@gmail.com

**Advertising and Drug
Promotion Department**
v_iliyna@ukr.net

The journal is included in the list of scientific periodicals of Ukraine, which can publish the results of dissertations on competition of the scientific degrees of doctor and candidate of sciences. Order of the MES of Ukraine dated 26.11.2020 No. 1471. Category B

Recommended for publication and distribution over the Internet by the scientific council of the Donetsk National Medical University, protocol No. 2 dated 27.02.2025

Registration: Media identifier R30-05649. Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 3279 dated December 5, 2024. The address at which the editorial control is carried out: Ukraine, Kropyvnytskyi, Yu. Kovalenka st., 4a

In Ukrainian and English

Folio: 60x84/8. Printer's sheet 12,09.
Circulation 8000. Order 2025-trauma-129.

Publisher Zaslavsky O.Yu.
zaslavsky@i.ua
Publishing entity certificate
ДК № 2128 dated 13.05.2005

Print: Landpress Ltd.

Editor-in-Chief

Klymovytsky Fedir

(Lyman, Ukraine)

Deputy Editor-in-Chief

Chorny Volodymyr

(Kyiv, Ukraine)

Executive Secretary

Huzovska Maria (Kramatorsk, Ukraine)

Editorial Board

Bondarenko S.Y. (Kharkiv, Ukraine),
Burianov O.A. (Kyiv, Ukraine),
Golovach I.Yu. (Kyiv, Ukraine),
Zazirny I.M. (Kyiv, Ukraine),
Strafun S.S. (Kyiv, Ukraine),
Tyazhelov Olexiy (Kharkiv, Ukraine),
Filipenko V.A. (Kharkiv, Ukraine),
Chernyshova O.Y. (Kramatorsk, Ukraine),
Hagen Schmal (Freiburg im Breisgau, Germany),
Robert Smigielski (Warszawa, Poland),
Francesco Benazzo (Pavia, Italia)

Editorial Council

Ankin M.L. (Kyiv, Ukraine),
Golovaha M.L. (Zaporizhzhia, Ukraine),
Guryev S.O. (Kyiv, Ukraine),
Klymovytsky R.V. (Lyman, Ukraine),
Korol S.O. (Kyiv, Ukraine),
Levitsky A.F. (Kyiv, Ukraine),
Piontkovsky V.K. (Rivne, Ukraine),
Sulyma V.S. (Ivano-Frankivsk, Ukraine),
Sukhin Y.V. (Odesa, Ukraine),
Fil A.Y. (Lviv, Ukraine),
Yarmoliuk Y.O. (Kyiv, Ukraine)

The editorial board not always shares the author's opinion. The author is responsible for the significance of the facts, proper names and other information used in the paper. No part of this publication, pictures or other materials may be reproduced or transmitted in any form or by any means without permission in writing form with reference to the original. All rights reserved.

© Donetsk National Medical University, 2025
© Research and Development Institute of Traumatology and Orthopedics of Donetsk National Medical University, 2025
© Zaslavsky O.Yu., 2025

Зміст

Оригінальні дослідження

Проценко В.В., Бур'янов О.А., Чорний В.С., Кухарук А.С., Солоніцин Є.О. Гігантоклітинна пухлина дистального відділу променевої кістки, результати хірургічного лікування	7
Полулях Д.М., Герасименко С.І., Полулях М.В., Герасименко А.С., Бабко А.М., Остапчук Р.М. Септична та асептична нестабільність ендопротеза колінного суглоба у хворих на ревматоїдний артрит (метааналіз)	17
Долгополов О.В., Безрученко С.О., Зінченко В.В., Суворов В.Л., Карпінська О.Д., Карпінський М.Ю. Експериментальне дослідження стабільності металоостеосинтезу ключиці накістковими пластинами при переломі її акроміального кінця з дефектом кісткової тканини.....	23
Нехлопочин О.С., Вербов В.В., Чешук Є.В., Карпінський М.Ю., Яресько О.В. Напружено-деформований стан моделі грудопоперекового відділу хребта з переломом хребця Th12 типу А1 за короткої транспедикулярної фіксації: аналіз компресійного навантаження	33
Rabab Abbas Hasan Частота виникнення гіпертрофічних рубців у пацієнтів з опіками	43
Климовицький Ф.В., Безсмертний Ю.О., Шевчук В.І., Макогончук А.В., Безсмертна Г.В. Реконструктивні операції ампутаційних кукс гомілок внаслідок бойової травми	50

Contents

Original Researches

V.V. Protsenko, O.A. Burianov, V.S. Chorny, A.S. Kukharuk, Ye.O. Solonitsyn Giant cell tumour of the distal radius: outcomes of surgical treatment	7
D.M. Poluliakh, S.I. Herasymenko, M.V. Poluliakh, A.S. Herasymenko, A.M. Babko, R.M. Ostapchuk Septic and aseptic instability of knee endoprosthesis in patients with rheumatoid arthritis (meta-analysis).....	17
O.V. Dolhopolov, S.O. Bezruchenko, V.V. Zinchenko, V.L. Suvorov, O.D. Karpinska, M.Yu. Karpinsky Experimental study of the stability of osteosynthesis of the clavicle with bone plates in case of a fracture of its suprahumeral end with a bone tissue defect.....	23
O.S. Nekhlepochyn, V.V. Verbov, Ye.V. Cheshuk, M.Yu. Karpinsky, O.V. Yaresko Stress-strain state of a thoracolumbar spine model with a Th12 type A1 vertebral fracture under short-segment pedicle fixation: analysis of compressive loading	33
Rabab Abbas Hasan Incidence of hypertrophic scar in burn patients.....	43
F.V. Klymovytskyi, Yu.O. Bezsmertnyi, V.I. Shevchuk, A.V. Makohonchuk, H.V. Bezsmertna Reconstructive surgeries of below-knee amputation stumps resulting from combat trauma.....	50

Сокрут М.В., Климовицький Ф.В., Сокрут О.П., Потапов Ю.О., Сокрут В.М., Литвинова О.В., Попов В.М., Муллахметов А.Г. Гомеокінетична класифікація артропатій.....	58	M.V. Sokrut, F.V. Klymovytskyi, O.P. Sokrut, Yu.O. Potapov, V.M. Sokrut, O.V. Lytvynova, V.M. Popov, A.G. Mullakhmetov Homeokinetic classification of arthropathies ..	58
Бондаренко Д.В., Безсмертний Ю.О., Шевчук В.І. Ремоделювання кукси кістки під впливом механічного навантаження	66	D.V. Bondarenko, Yu.O. Bezsmertnyi, V.I. Shevchuk Remodelling of bone stumps under the influence of mechanical loading	66
Чорна В.В., Петрушенко В.В., Рибінський М.В., Томашевський А.В., Коломієць В.В., Поляруш В.В., Тимчук Є.В. Психологічна стійкість та менталізація військових хірургів в умовах бойового стресу: мультидисциплінарний підхід до подолання емоційного вигорання	77	V.V. Chorna, V.V. Petrushenko, M.V. Rybinskyi, A.V. Tomashevskyi, V.V. Kolomiets, V.V. Poliarush, Ye.V. Tymchuk Psychological resilience and mentalization of military surgeons under combat stress: a multidisciplinary approach to overcoming emotional burnout	77
Abdulameer M. Hussein, Laith Fathi Sharba Ретроспективний аналіз травм грудної клітки: результати лікування в закладі третинного рівня у воєнний час.....	89	Abdulameer M. Hussein, Laith Fathi Sharba A retrospective analysis of thoracic trauma: outcomes from a tertiary care hospital in war time	89
Огляд		Reviews	
Бур'янов О.А., Кваша В.П., Ярмолюк Ю.О., Пасенко М.С. Сучасні технології заміщення дефектів кісткової тканини (bone transport, Masquelet) (огляд літератури та метааналіз)	93	O.A. Burianov, V.P. Kvasha, Yu.O. Yarmoliuk, M.S. Pasenko Modern technologies for replacing bone tissue defects (bone transport, Masquelet): literature review and meta-analysis	93

Фастум® гель

Кетопрофен 2,5 % гель



**Лікування ревматичного
або травматичного БОЛЮ
в кістково-м'язовій
системі та суглобах¹**

30, 50, 100 г гелю у тубі



Інформація про рецептурний лікарський засіб для медичних і фармацевтичних працівників.

Перед застосуванням, будь ласка, обов'язково уважно ознайомтеся з повним текстом чинної інструкції для медичного застосування.

Скорочена інструкція для медичного застосування лікарського засобу ФАСТУМ® ГЕЛЬ (FASTUM® GEL)¹

Склад. 1 г гелю містить кетопрофену 0,025 г. **Показання.** Місцеве лікування ревматичного або травматичного болю в кістково-м'язовій системі та суглобах, зокрема при забоях, дисторціях, розтягненнях м'язів, ригідності ший, люмбаго. **Протипоказання.** Гіперчутливість до будь-якого компонента препарату; в анамнезі гіперчутливість та реакції фоточутливості; відомі реакції гіперчутливості (симптоми астми, алергічний риніт та кропивниця) при застосуванні кетопрофену, феніфібрату, тіапрофенової кислоти, ацетилсаліцилової кислоти або інших НПЗП; в анамнезі шкірні прояви алергії при застосуванні кетопрофену, тіапрофенової кислоти, феніфібрату, УФ-блокаторів чи інших парфумерних продуктів; вплив сонячних променів та УФ-опромінення в солярії під час лікування і протягом двох тижнів після; нанесення на шкіру з патологічними змінами (дерматоз, екзема чи акне), на інфіковану шкіру або на відкриті рани, на шкіру навколо очей; третій триместр вагітності.

Особливості застосування. Під час лікування та протягом 2 тижнів після його завершення рекомендується носити одяг, який закриває ділянку нанесення, для уникнення фоточутливості. 

Спосіб застосування та дози. Гель слід наносити тонким шаром на уражені ділянки 1 або 2 рази на добу, злегка масажуючи для кращої абсорбції. **Побічні реакції.** Іноді: місцеві шкірні реакції (еритема, екзема, свербіж і відчуття печіння); рідко: дерматологічні реакції (фотосенсибілізація, бульозні висипи і кропив'янка). Безпека та ефективність застосування у дітей не встановлені. **Категорія відпуску.** За рецептом.

¹Інструкція для медичного застосування лікарського засобу ФАСТУМ® ГЕЛЬ, РП № UA/10841/01/01, дата останнього перегляду 11.08.2025.

Представництво "Берлін-Хемі/А. Менаріні Україна ГмбХ". Адреса: м. Київ, вул. Березняківська, 29. Тел.: +38 (044) 494 33 88.

E-mail: berlin-chemie@menarini.com.ua

UA-Fas-03-2025-V1-Press. Останній перегляд 02.10.2025.



**BERLIN-CHEMIE
MENARINI**

Проценко В.В.¹, Бур'янов О.А.², Чорний В.С.², Кухарук А.С.², Солоніцин Є.О.¹

¹ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

²Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

Гігантоклітинна пухлина дистального відділу променевої кістки, результати хірургічного лікування

Резюме. Актуальність. Гігантоклітинна пухлина (ГКП) дистального відділу променевої кістки є доброякісною, місцевоагресивною пухлиною, яка характеризується частими рецидивами та має певний метастатичний потенціал. Внутрішньокісткова або сегментарна резекція дистального відділу променевої кістки з ГКП створює дефект у дистальному відділі променевої кістки. Основними хірургічними методиками реконструкції такого дефекту є застосування спонгіозних ало-/автотрансплантатів, штучних матеріалів, поліметилметакрилату, васкуляризованих і не васкуляризованих кісткових автотрансплантатів, кістково-суглобових алотрансплантатів та індивідуальних ендопротезів. Ми проводили оцінку онкологічних, хірургічних і функціональних результатів при ГКП дистального відділу променевої кістки з урахуванням різних методик хірургічних втручань і реконструкцій. **Мета:** хірургічне видалення ГКП дистального відділу променевої кістки, зниження ймовірності рецидиву пухлини та збереження функції променево-зап'ясткового суглоба. **Матеріали та методи.** Проведено хірургічне лікування 21 хворого з ГКП дистального відділу променевої кістки. Середній вік хворих становив 28,7 року (діапазон від 18 до 39 років). Проліковано 8 (38,1 %) пацієнтів із ГКП II/III ступеня (за Кампаначчі) дистального відділу променевої кістки, після резекції дистального сегмента променевої кістки з пухлиною та реконструкції дефекту кістки за допомогою не васкуляризованого малогомілкового автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки, фіксованого за допомогою пластини або серкляжів до залишку променевої кістки. 7 (33,3 %) пацієнтам із ГКП I ступеня (за Кампаначчі) проведена внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту кістки матеріалом на основі біоактивного скла (біокомполімером) або спонгіозна автопластика. 1 (4,8 %) пацієнту з ГКП II ступеня (за Кампаначчі) та 2 (9,5 %) пацієнтам із рецидивом пухлини виконана внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту поліметилметакрилатом (кістковим цементом), 2 (9,5 %) пацієнтам із ГКП III ступеня (за Кампаначчі) та 1 (4,8 %) пацієнту після повторних рецидивів пухлини виконано сегментарну резекцію кістки із заміщенням дефекту автотрансплантатом із проксимального відділу малогомілкової кістки й артродез у променево-зап'ястковому суглобі. **Результати.** Середній період спостереження становив 5,5 року (2,8–11,2 року). Унаслідок проведеного лікування у 3 (14,3 %) пацієнтів спостерігалися ускладнення — вивих автотрансплантата у променево-зап'ястковому суглобі при застосуванні не васкуляризованого малогомілкового автотрансплантата, вивих виправлено за рахунок повторного хірургічного втручання. Рецидиви пухлини спостерігалися у 3 (14,3 %) пацієнтів. У першому випадку після внутрішньокісткової резекції та пластики матеріалом на основі біоактивного скла виконано внутрішньокісткову резекцію, видалення матеріалу та пластику дефекту кістковим цементом, у другому — після внутрішньокісткової резекції та спонгіозної автопластики виконано внутрішньокісткову резекцію, видалення матеріалу та пластику дефекту кістковим цементом, у третьому — після внутрішньокісткової резекції та пластики кістковим цементом у зв'язку з повторним рецидивом пухлини виконано резекцію дистального сегмента променевої кістки з рецидивом пухлини й артродез у променево-зап'ястковому суглобі за допомогою автотрансплантата та металоостеосинтезу пластиною. Функціональні результати верхньої кінцівки

після органозберігаючих операцій із приводу ГКП дистального відділу променевої кістки за шкалою MSTS становили в середньому: після внутрішньокісткової резекції та пластики матеріалом на основі біоактивного скла або спонгіозної автопластики — 98,52 % (97,7–99,9 %), після резекції дистального сегмента променевої кістки з пухлиною та реконструкції дефекту кістки за допомогою невааскуляризованого маломілкового автотрансплантата — 89,34 % (78,6–92,5 %). Функціональні результати кінцівки оцінені у 21 пацієнта, відмінні результати отримані у 5 (23,8 %) пацієнтів, добрі — у 10 (47,6 %), задовільні — у 6 (28,6 %). Середній час зрощення у маломілково-променевому з'єднанні після застосування невааскуляризованого маломілкового автотрансплантата становив 7,5 місяця (3,2–16,1 місяця). Середня сила хвату прооперованої верхньої кінцівки після застосування невааскуляризованого маломілкового автотрансплантата від нормальної сторони становила 50 % (35–69 %), а фактичне середнє значення для прооперованої сторони — 15 кг порівняно з 30 кг для протилежної нормальної сторони. Середній діапазон рухів становив: супінація передпліччя — 47° (31–69°), пронація передпліччя — 33° (16–55°), згинання кисті у долонний бік — 40° (18–67°), розгинання кисті (у тильний бік) — 29° (11–52°), при комбінованих рухах — 151° (75–180°). Загалом 59 % (24–70 %) комбінованого діапазону рухів було збережено у прооперованої сторони порівняно з протилежною нормальною стороною. 85,7 % прооперованих пацієнтів були задоволені результатами лікування. **Висновки.** Внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту різними пластичними матеріалами є методикою вибору при ГКП I ступеня. Резекція дистального сегмента променевої кістки з пухлиною й автопластика дефекту кістки за допомогою проксимального сегмента невааскуляризованої маломілкової кістки є ефективною методикою при ГКП II/III ступеня. Внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту поліметилметакрилатом (кістковим цементом) є методикою вибору при рецидиві ГКП. Артродез у променево-зап'ястковому суглобі за допомогою автотрансплантата та металоостеосинтез пластиною є також методикою вибору при повторних рецидивах ГКП. Рецидив пухлини пов'язуємо з абластичним і радикальним видаленням ГКП. Ускладнення після органозберігаючих операцій із приводу ГКП дистального відділу променевої кістки пов'язуємо з недотриманням пацієнтами рекомендацій у післяопераційний період.

Ключові слова: гігантоклітинна пухлина; променева кістка; дистальний відділ; комбіноване лікування; хірургічне лікування; функція кінцівки; рецидив пухлини

Вступ

Гігантоклітинна пухлина (ГКП) — це доброякісна місцевеоагресивна пухлина кістки з певним метастатичним потенціалом. ГКП кістки становить 20 % всіх доброякісних пухлин кісток і менше 5 % усіх первинних пухлин кісток [1]. Незважаючи на доброякісну природу ГКП, вона демонструє широкий спектр поведінки, включаючи локальний рівень рецидивів до 50 %, мультицентричність, віддалені метастатичні ураження, інвазивність і до 10 % ймовірність злоякісної трансформації [2]. ГКП переважно вражає епіметафізи довгих кісток і є третьою (10 %) за поширеністю локалізацією в дистальному відділі променевої кістки [3]. У літературі підтверджується тісний зв'язок вторинної саркоматозної трансформації ГКП, яка лікується променевою терапією [11]. Метастази при ГКП кісток зустрічаються лише у 3 % пацієнтів, але поведінка легеневих метастазів непередбачувана [5, 12, 13]. Варіанти лікування ГКП дистального відділу променевої кістки включають кюретаж із кістковою пластикою або цементуванням, ексцизію *en bloc* і реконструкцію за допомогою несудинного або судинного фібулярного автотрансплантата, кістково-суглобового алотрансплантата, ліктьової транслокації або ендопротезування [4]. За даними літератури, ускладнення після хірургічного лікування ГКП дистального відділу променевої кістки становлять від 10 до 50 % [16, 17]. Частота рецидивів після ізольованого кюретажу — від 12 до 65 %, кюретажу з ад'ювантами — від 12 до 27 %, резекції *en bloc* — від 0 до 12 % [6]. У деяких дослідженнях частота рецидивів після кюретажу при ГКП дистального відділу променевої

кістки становить від 27 до 35 %, що є вищою порівняно з рецидивами при кюретажі в інших довгих кістках [7, 8]. Після появи деносумабу лікування ГКП змінилося із суто хірургічного на комбіноване. Деносумаб можна використовувати як неоад'ювантну терапію, створюючи новоутворену кістку на периферії ураження, пропонуючи механічний каркас, при якому можна виконати кюретаж, що дозволяє покращити функціонування пацієнта [9, 10, 14, 15]. Ми представляємо наш досвід застосування різних методик хірургічного лікування ГКП дистального відділу променевої кістки.

Матеріали та методи

У відділі ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» проведено хірургічне лікування 21 пацієнта з ГКП дистального відділу променевої кістки. Середній вік хворих становив 28,7 року (діапазон від 18 до 39 років). Жінок було 14, чоловіків — 7. 13 пацієнтів були з ураженням дистального відділу лівої променевої кістки, 8 — з ураженням дистального відділу правої променевої кістки. У 2 випадках рентгенологічно спостерігався патологічний перелом променевої кістки в ділянці локалізації пухлини. Визначення методики хірургічного лікування у пацієнтів проводили відповідно до радіологічного методу класифікації Кампаначчі, який складається із трьох ступенів [22]. Пухлини I ступеня мали чітку межу з тонким краєм зрілої кістки, кістковий кортекс був інтактним. Ураження II ступеня мали відносно чіткі краї, але не було рентгеноконтрастного кортикального краю. Ступінь III був визначений як ураження з нечіткими межами, що свідчило

про швидке зростання пухлини, яке, можливо, проникло у навколишні м'які тканини.

Методики хірургічних втручань, виконані у пацієнтів, представлені у табл. 1

Нами було проліковано 8 (38,1 %) пацієнтів із ГКП II/III ступеня (за Кампаначчі) дистального відділу променевої кістки, після резекції дистального сегмента променевої кістки з пухлиною та реконструкції дефекту кістки за допомогою неваскуляризованого малогомілкового автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки, фіксованого за допомогою пластини або серкляжів до залишку променевої кістки. 7 (33,3 %) пацієнтам із ГКП I ступеня (за Кампаначчі) проведена внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту кістки матеріалом на основі біоактивного скла — біокомпозитом або спонгіозна автопластика. 3 (14,3 %) пацієнтам із рецидивом пухлини виконана внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту поліметилметакрилатом (кістковим цементом), 3 (14,3 %) пацієнтам із ГКП III ступеня (за Кампаначчі) виконано сегментарну резекцію кістки із заміщенням дефекту автотрансплантатом із проксимального відділу малогомілкової кістки або сегментом із клубової кістки й артродез у променево-зап'ястковому суглобі.

Вибір методики хірургічного втручання (внутрішньокісткова резекція кістки або застосування неваскуляризованого малогомілкового автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки) при пухлинах II ступеня ґрунтувався на індивідуальному підході, причому одним із важливих факторів було те, що не спостерігалось руйнування кортикального шару кістки під час внутрішньокісткової резекції кістки.

У 21 випадку первинне передопераційне встановлення діагнозу ГКП було підтверджено відкритою або трепанбіопсією. Усім пацієнтам перед операцією виконувалася рентгенограма променевої кістки (рис. 1), КТ променевої кістки та МРТ ураженого променево-зап'ясткового суглоба.

При надходженні до стаціонару, після встановлення діагнозу цитологічно та гістологічно, пацієнтам про-

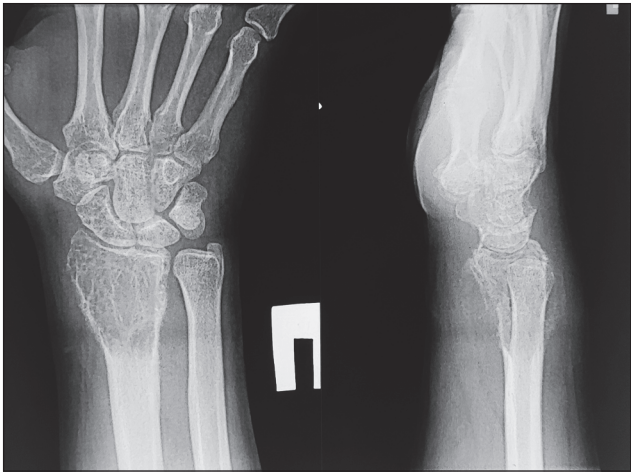


Рисунок 1. Фотовідбитки рентгенограми хворого С., ГКП дистального відділу правої променевої кістки

дилася передопераційна підготовка з наступним хірургічним лікуванням. Останнім часом у клінічній практиці поширилася комбінована терапія ГКП. Препарат деносумаб, моноклональне антитіло до рецепторного активатора ліганду ядерного фактора каппа-В (RANK) (RANKL), продемонстрував ефективну профілактику втрати кісткової маси у пацієнтів із ГКП шляхом пригнічення залучення й активності остеокластичних клітин. Зазвичай деносумаб показаний пацієнтам із прогресуючим станом (ступінь III за Кампаначчі). Основна мета передопераційного застосування деносумабу — зменшити біль, відновити функцію зап'ястка та забезпечити кращий стан кістки для хірургічного втручання. Перед операцією деносумаб вводили підшкірно в дозі 120 мг на 1, 8, 15 і 29-й день як навантажувальну дозу протягом першого місяця, а потім по 120 мг кожні чотири тижні [10].

При первинно верифікованій ГКП I ступеня (за Кампаначчі) дистального відділу променевої кістки тактика лікування була такою: проводилася внутрішньокісткова резекція кістки з пухлиною, електрокоагуляція стінок кісткової порожнини та заповнення

Таблиця 1. Методики хірургічних втручань

Втручання	Абс. к-сть	Відсотки
Резекція дистального сегмента променевої кістки з пухлиною та автопластика дефекту кістки за допомогою проксимального сегмента неваскуляризованої малогомілкової кістки	8	38,1
Внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту матеріалом на основі біоактивного скла (біокомпозит) або автопластика	7	33,3
Внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту поліметилметакрилатом (кістковим цементом)	3	14,3
Артродез у променево-зап'ястковому суглобі за допомогою автотрансплантата та металоостеосинтезу пластиною	3	14,3
Усього	21	100

дефекту кістки матеріалом на основі біоактивного скла — біокомполімером, який виготовлявся в лабораторії неорганічної хімії шляхом осадження, або спонгіозним автотрансплантатом, забір якого проводився з крила здухвинної кістки.

При ураженні ГKP II/III ступеня (за Кампаначчі) дистального відділу променевої кістки виконувалася кістково-пластична операція, які складалася з резекції дистального відділу променевої кістки й автопластики невазуляризованим малоомілковим автотрансплантатом проксимального відділу малоомілкової кістки.

Техніка операції. Накладаємо джгут у середній третині плеча. Розтин шкіри завдовжки до 10–15 см проводимо по тильній поверхні нижньої третини передпліччя над проекцією променевої кістки. Дистальний кінець розтину доходять до зап'ястка. Після розтину шкіри, підшкірної клітковини та фасції виділяємо сухожилки розгиначів пальців, які відводимо у сторони. Оголюємо окістя променевої кістки, обробляємо його распатером у місці резекції, пилою Джіглі перепилюємо променеву кістку на 3 см проксимальніше ураження. Розтинаємо капсулу променево-зап'ясткового суглоба та відсікаємо від променевої кістки. Звільняємо ділянку променевої кістки, яка була резеційована, від навколишніх тканин і видаляємо разом із пухлиною. Проводимо гемостаз у рані, знімаємо джгут і проводимо остаточний гемостаз у рані.

Після цього проводимо заготовку автотрансплантата. Накладаємо джгут у середній третині стегна. Проводимо поздовжній розтин шкіри по зовнішній поверхні гомілки у верхній третині на 5 см проксимальніше голівки малоомілкової кістки. Розтинаємо фасцію по всій довжині шкірного розтину, після цього у верхній частині рани знаходимо малоомілковий нерв і, щоб вберегти його від пошкоджень, обережно виділяємо його з тканин. Звільнивши нерв, стягуємо його м'якою гумовою стрічкою, поміщаючи перед голівкою малоомілкової кістки. Знаходимо простір між камбалоподібним м'язом ззаду і перонеальними м'язами спереду і через нього проникаємо до малоомілкової кістки. Дістаємо наперед перонеальні м'язи, розтинаємо поздовжньо окістя і оголюємо кістку на необхідну довжину. Пилою Джіглі перепилюємо малоомілкову кістку, звільняємо сегмент кістки, що резеціюється, від навколишніх тканин, акуратно виділяємо голівку малоомілкової кістки з суглоба та видаляємо автотрансплантат з рани. Знімаємо джгут і проводимо гемостаз у рані, накладаємо пошарові шви на рану гомілки та дрнуємо її активним трубчастим дренажом.

Заготовлений автотрансплантат малоомілкової кістки поміщаємо на місце резеційованого сегмента променевої кістки на передпліччі. Наші спостереження показали, що автотрансплантат краще брати з гомілки тієї самої сторони, що й уражена променева кістка, оскільки при підгонці трансплантата на передпліччі створюються оптимальні умови (нахил фасетки наперед, верхівка голівки малоомілкової кістки

займає місце шилоподібного відростка променевої кістки). Проксимальний кінець автотрансплантата сполучаємо з дистальним кінцем променевої кістки за типом «замка» і з'єднуємо їх за допомогою дрітчастих серкляжів або металевої пластини. Для кращого утримання кісток і профілактики вивиху в променево-зап'ястковому суглобі частково відновлюємо капсулу суглоба та сполучаємо кістки кетгуттовими швами у радіоульнарному зчленуванні. Капсулу променево-зап'ясткового суглоба, що залишилася, підшиваємо шовком по тильній і променевій поверхні до автотрансплантата. Вказані заходи надійно попереджають розвиток вивиху в променево-зап'ястковому суглобі, що має велике значення для подальшого відновлення функції кінцівки. Накладаємо пошарові шви на рану і дрнуємо рану гумовою смужкою. Накладаємо асептичну пов'язку, гіпсову шину від пальців кисті до середньої третини плеча (згинання у ліктьовому суглобі під кутом 90°). Фіксація передпліччя гіпсовою шиною до ліктьового суглоба проводиться упродовж 6 місяців, під постійним рентгенологічним контролем. У середньому протягом 6 місяців відбувається добре зрощення малоомілкового автотрансплантата із залишками променевої кістки. Через 3 місяці були розпочаті легкі активні та допоміжні вправи для зап'ястя, інтенсивність яких поступово збільшувалася залежно від переносимості та прогресу. Після припинення іммобілізації призначали комплекс реабілітаційних заходів, який складався з масажу кисті, передпліччя і плеча прооперованої кінцівки та лікувальної фізкультури для променево-зап'ясткового і ліктьового суглобів. Протягом року заборонялося виконувати важкі дії верхньою кінцівкою. Рентгенограму передпліччя повторювали через кожні 2 місяці, щоб визначити наявність утворення кісткової мозолі на місці з'єднання малоомілкового автотрансплантата та залишку променевої кістки, рецидиву пухлини або ускладнень, пов'язаних з автотрансплантатом. Після першого року спостереження на другий рік рентгенограми виконувалися з інтервалом 3 місяці протягом року та з інтервалом 6 місяців на третій рік спостереження, потім раз на рік із подальшим спостереженням.

Динамометр використовувався нами для вимірювання сили захоплення та порівняння з протилежною верхньою кінцівкою. Подібним чином гоніометр використовувався для вимірювання діапазону руху та порівняння з протилежною кінцівкою. Функціональний результат прооперованої кінцівки визначався за шкалою MSTs, за допомогою якої оцінювали пацієнтів на основі факторів (біль, функціональна активність та емоційне прийняття), що стосуються пацієнта загалом, і факторів, характерних для будь-якої верхньої кінцівки (положення руки, спритність рук і здатність піднімати) [23]. Результати були встановлені як відмінні для оцінки MSTs > 90 %, хороші для 80–90 %, задовільні для 60–80 % і погані для ≤ 60 %. Для оцінки якості життя хворих після хірургічного лікування проводили опитування за системою EORTC QLQ-C30.

Отримані результати

Середній період спостереження становив 5,5 року (2,8–11,2 року). Після проведеного лікування у 3 (14,3 %) пацієнтів спостерігалися ускладнення — вивих автотрансплантата у променево-зап'ястковому суглобі при застосуванні не васкуляризованого малогомілкового автотрансплантата, вивих виправлено за рахунок повторного хірургічного втручання. Рецидиви пухлини спостерігалися у 3 (14,3 %) пацієнтів. У першому випадку після внутрішньокісткової резекції та пластики матеріалом на основі біоактивного скла виконано внутрішньокісткову резекцію, видалення матеріалу та пластику дефекту кістковим цементом, у другому — після внутрішньокісткової резекції й автопластики виконано внутрішньокісткову резекцію, видалення матеріалу та пластику дефекту кістковим цементом, у третьому — після внутрішньокісткової резекції та пластики кістковим цементом, у зв'язку з повторним рецидивом пухлини, виконано резекцію дистального сегмента променевої кістки з рецидивом

пухлини й артродез у променево-зап'ястковому суглобі за допомогою автотрансплантата та металоостеосинтезу пластиною.

Наводимо результати хірургічного лікування хворої П., з ГКП I ступеня (за Кампаначчі) дистального відділу променевої кістки (рис. 2а, б).

Наводимо результати хірургічного лікування пацієнта М., з ГКП II ступеня (за Кампаначчі) дистального відділу променевої кістки, після резекції дистального сегмента променевої кістки з пухлиною та реконструкції дефекту кістки за допомогою не васкуляризованого малогомілкового автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки, фіксованого за допомогою пластики до залишку променевої кістки (рис. 3).

Наводимо результати хірургічного лікування пацієнтки О., з ГКП III ступеня (за Кампаначчі), якій виконано сегментарну резекцію кістки із заміщенням дефекту автотрансплантатом із проксимального відділу малогомілкової кістки та з формуванням артродезу в променево-зап'ястковому суглобі (рис. 4).

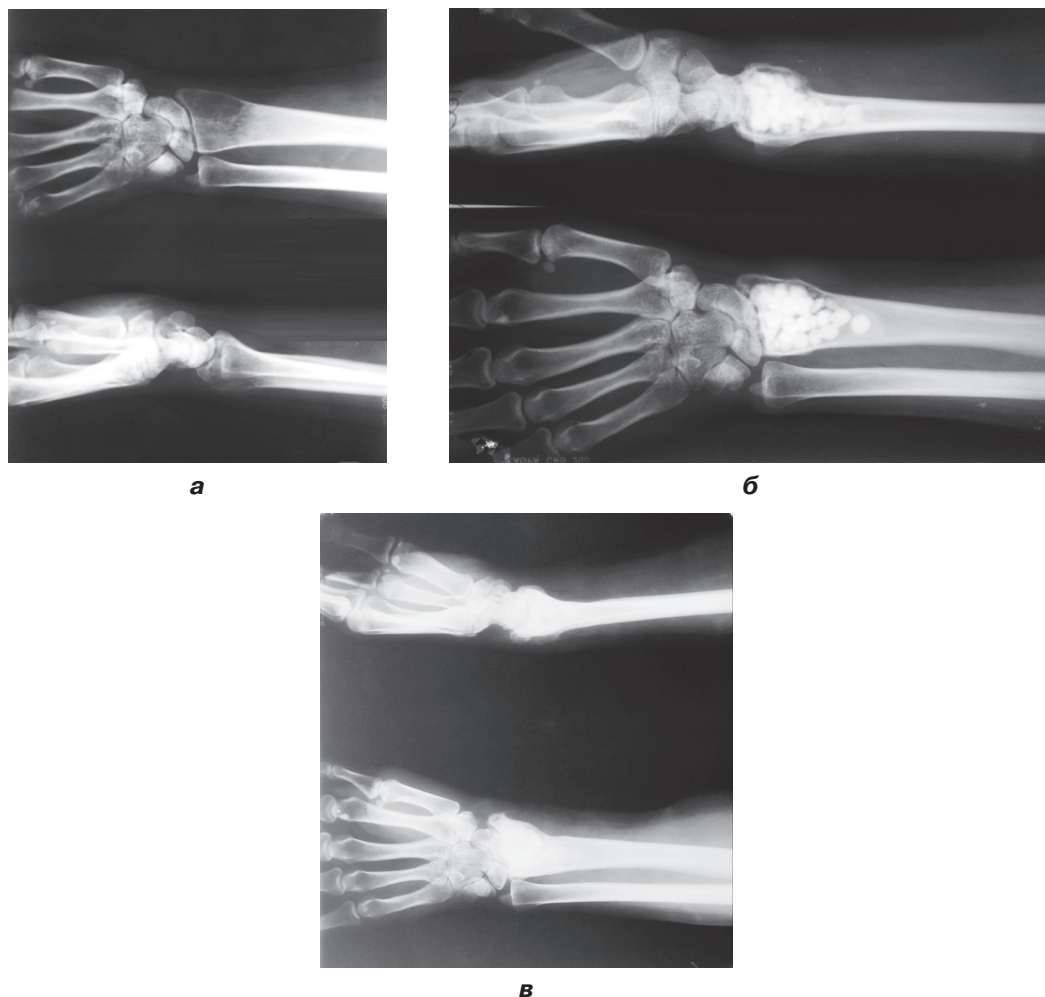


Рисунок 2. Фотовідбитки рентгенограми хворої П.: а) ГКП дистального відділу правої променевої кістки; б) стан після внутрішньокісткової резекції дистального відділу променевої кістки та пластики біокомполімером; в) часткова перебудова пластичного матеріалу в порожнині кістки через 6 місяців

Функціональні результати верхньої кінцівки після органозберігаючих операцій із приводу ГКП дистального відділу променевої кістки за шкалою MSTS становили у середньому: після внутрішньокісткової резекції та пластики матеріалом на основі біоактивного скла, або спонгіозної автопластики, або пластики поліметилметакрилатом — 98,52 % (97,7–99,9 %), після

резекції дистального сегмента променевої кістки з пухлиною та реконструкції дефекту кістки за допомогою невааскуляризованого малогомілкового автотрансплантата — 89,34 % (78,6–92,5 %). Функціональні результати кінцівки оцінені у 21 пацієнта, відмінні результати отримані у 5 (23,8 %) пацієнтів, добрі — у 10 (47,6 %), задовільні — у 6 (28,6 %).

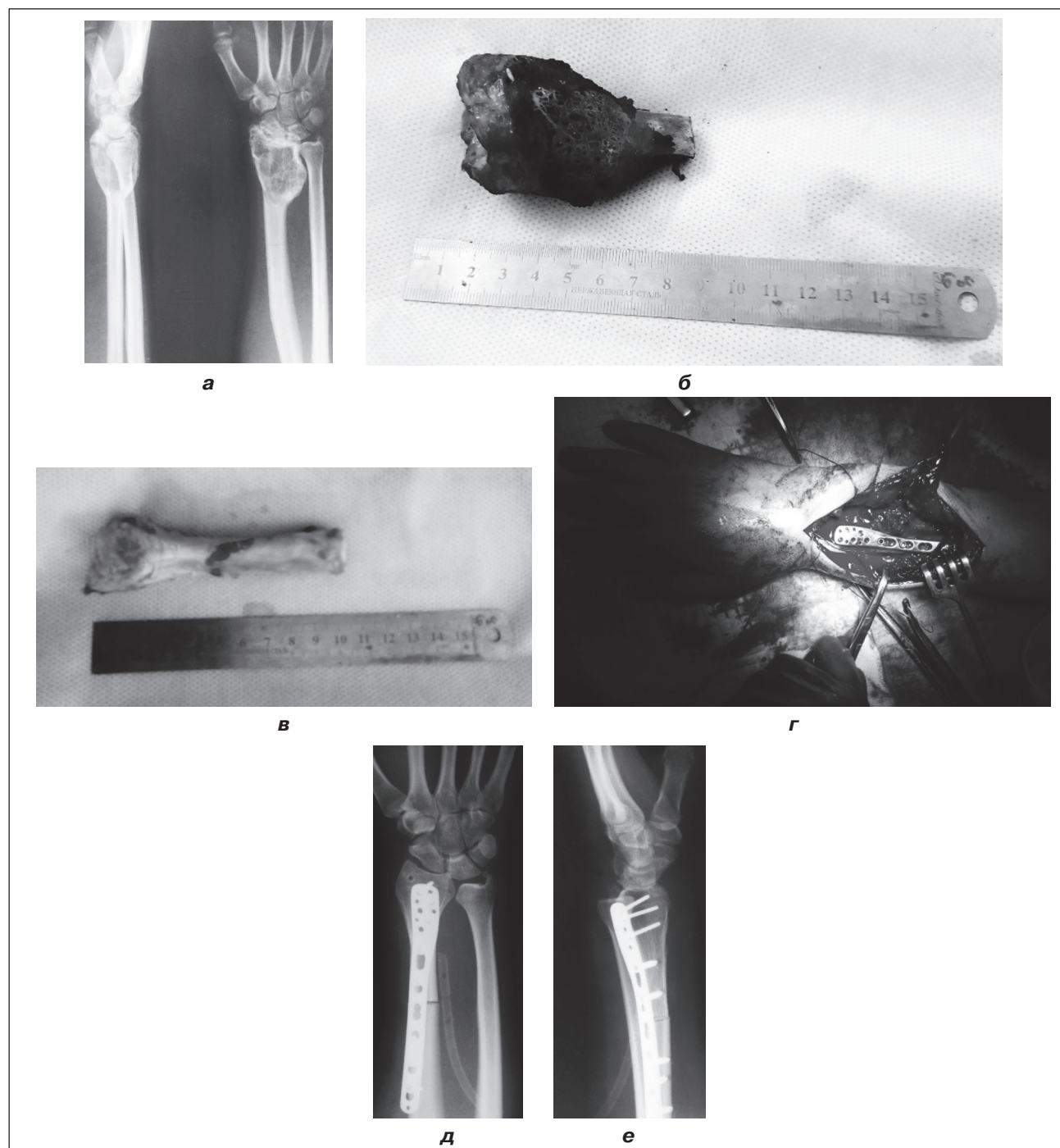


Рисунок 3. Фотовідбитки рентгенограм хворого М.: а) ГКП дистального відділу променевої кістки; б) фото видаленого сегмента дистального відділу променевої кістки з пухлиною; в) фото невааскуляризованого автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки; г) інтраопераційне фото встановлення невааскуляризованого малогомілкового автотрансплантата та фіксація його пластиною до залишку променевої кістки; д) пряма проєкція; е) бокова проєкція

Середній час зрощення у малогомілково-променевою з'єднанні після застосування неваскуляризованого малогомілкового автотрансплантата становив 7,5 місяця (3,2–16,1 місяця). Середній час перебудови матеріалу на основі біоактивного скла у порожнині променевої кістки після видалення пухлини та пластики — 9 місяців (6,1–13,5). Середній час перебудови спонгіозного автотрансплантата у порожнині променевої кістки після видалення пухлини та пластики — 6,8 місяця (5,3–10,4). Середня сила хвату прооперованої верхньої кінцівки після застосування неваскуляризованого малогомілкового автотрансплантата від нормальної сторони становила 50 % (35–69 %), а фактичне середнє значення для прооперованої сторони — 15 кг порівняно з 30 кг для протилежної нормальної сторони. Середній діапазон рухів становив: супінація передпліччя — 47° (31–69°), пронація передпліччя — 33° (16–55°), згинання кисті у долонний бік — 40° (18–67°), розгинання кисті (у тильний бік) — 29° (11–52°), при комбінованих рухах — 151° (75–180°). Загалом 59 % (24–70 %) комбінованого діапазону рухів було збережено у прооперованої сторони порівняно з протилежною нормальною стороною. 85,7 % прооперованих пацієнтів були задоволені результатами лікування. Якість життя хворих покращилася у середньому з 35 балів у передопераційний період до 85 балів у післяопераційний.

Обговорення

Клінічна поведінка ГKP дистального відділу променевої кістки непередбачувана. Хірургічне лікування ГKP дистального відділу променевої кістки різноманітне. У літературі повідомляється, що найбільше хірургічних втручань відбувається із застосуванням неваскуляризованого автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки [18]. Використання проксимального відділу малогомілкової кістки як заміника резецированого дистального відділу променевої кістки є доцільним через подібність анатомічних форм і доступність автотрансплантатів [19]. У деяких дослідженнях згадується про автопластику дистального відділу променевої кістки з непоганими функціональними результатами [20]. Деякі автори повідомляють про високий рівень післяопераційних ускладнень після автопластики дистального відділу променевої кістки при ГKP до 50 % [16]. У нашому дослідженні післяопераційні ускладнення спостерігалися у 14,3 % пацієнтів, що вважаємо непоганим результатом хірургічного лікування. Найчастішим ускладненням після хірургічного лікування у нашій серії був вивих автотрансплантата у променево-зап'ястковому суглобі у 3 пацієнтів. У нашому дослідженні частота рецидивів після кюретажу з ад'ювантами була 14,3 %, за даними літератури — від 12 до 27 %, що практично збігається з даними [6]. 2 пацієнтам із рецидивом ГKP, яким спочатку була виконана внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки, було проведено видалення рецидиву пухлини та пластику порожнини кістки поліметилметакрилатом, що говорить про те,

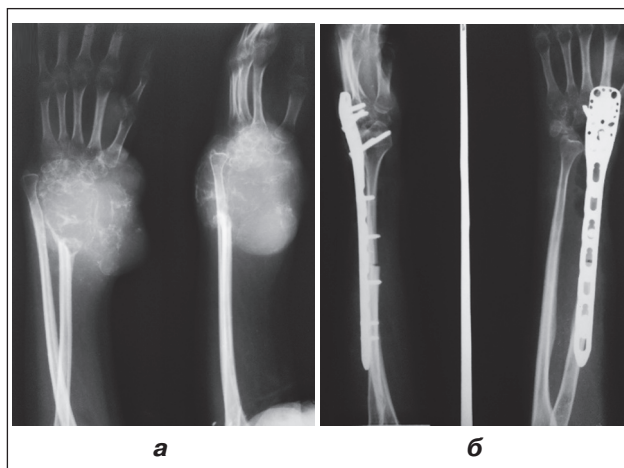


Рисунок 4. Фотовідбитки рентгенограм пацієнтки О.: а) ГKP дистального відділу променевої кістки; б) реконструкція дефекту кістки за допомогою неваскуляризованого малогомілкового автотрансплантата проксимального відділу малогомілкової кістки, фіксованого за допомогою пластики до залишку променевої кістки з формуванням артродезу в променево-зап'ястковому суглобі

що більшість рецидивів після внутрішньокісткової резекції можна лікувати повторно внутрішньокістковою резекцією, якщо дозволяє кортикальний шар кістки. Ми досягли трохи гірших функціональних результатів 50 % (35–69 %) проти 71 % (42–86 %) для середньої сили хвату прооперованої верхньої кінцівки після застосування неваскуляризованого малогомілкового автотрансплантата та збереження 59 % (24–70 %) комбінованого діапазону рухів на прооперованій стороні порівняно з 64 % (29–78 %) комбінованого діапазону рухів на прооперованій стороні у деяких дослідженнях [24]. Особливо слід відзначити відносно добре збережені рухи супінації та пронації передпліччя, які є найважливішими для функціональної здатності. Середній час для зрощення у місці з'єднання трансплантата становив 7,5 місяця (3,2–16,1 місяця), що практично збігається з даними інших авторів, у яких також застосована автопластика малогомілковою кісткою [16]. Деякі автори повідомляють про добрі та відмінні функціональні результати променево-зап'ясткового суглоба у пацієнтів із ГKP дистального відділу променевої кістки після реконструкції неваскуляризованим автотрансплантатом малогомілкової кістки [21], а також про результати застосування артродезу променево-зап'ясткового суглоба [22], що також збігається з нашим дослідженням. Усі прооперовані нами пацієнти залишилися задоволені результатом лікування: і косметичною формою передпліччя, і функціональним результатом променево-зап'ясткового суглоба та верхньої кінцівки. Ми не застосовували для реконструкції променево-зап'ясткового суглоба алотрансплантати й ендопротези, що є пріоритетом подальших досліджень.

Висновки

1. Внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з ГКП та пластика дефекту різними матеріалами є методикою вибору при ГКП I ступеня.

2. Резекція дистального сегмента променевої кістки з пухлиною й автопластика дефекту кістки за допомогою проксимального сегмента невазуляризованої маломілкової кістки є ефективною методикою при ГКП II/III ступеня.

3. Внутрішньокісткова резекція дистального відділу променевої кістки з пухлиною та пластика дефекту поліметилметакрилатом (кістковим цементом) є методикою вибору при рецидиві ГКП.

4. Артродез у променево-зап'ястковому суглобі за допомогою автотрансплантата та металоостеосинтезу пластиною є методикою вибору при повторних рецидивах ГКП.

5. Рецидив пухлини пов'язуємо з абластичним і радикальним видаленням ГКП.

6. Ускладнення після органозберігаючих операцій із приводу ГКП дистального відділу променевої кістки пов'язуємо з недодержанням пацієнтами рекомендацій у післяопераційний період.

Перспектива подальшого дослідження полягає в тому, що хірургічне лікування ГКП дистального відділу променевої кістки є перспективним методом і потребує постійного вдосконалення як техніки хірургічного втручання, так і методик реконструкції, завдяки чому вдається зменшити кількість післяопераційних ускладнень і рецидивів пухлини, а також покращити функцію верхньої кінцівки.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів і власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Жодних вигод у будь-якій формі не було отримано і не буде отримано від комерційної сторони, пов'язаної прямо чи опосередковано з предметом цієї статті.

Етичні норми. Це дослідження було схвалено комісією з питань біоетичної експертизи та етики наукових досліджень при НМУ імені О.О. Богомольця, інформовану згоду на участь у дослідженні отримували від дорослих пацієнтів, які перебували на лікуванні у клінічних відділах Державної установи «Інститут травматології та ортопедії НАМН України Національної академії медичних наук України», автори несуть відповідальність за всі аспекти роботи, гарантуючи належне дослідження та вирішення питань, пов'язаних із точністю чи цілісністю будь-якої частини роботи.

Внесок авторів. Кухарук А.С. — задумав, розробив і провів дослідження; Солоніцин Є.О. — проаналізував та інтерпретував клінічні дані; Чорний В.С., Бур'янов О.А. — підготували рукопис; Проценко В.В. — переглянув і відредагував рукопис. Усі автори зробили значний інтелектуальний внесок у роботу та схвалили її для публікації.

Список літератури

1. Li H, Gao J, Gao Y, Lin N, Zheng M, Ye Z. Denosumab in Giant Cell Tumor of Bone: Current Status and Pitfalls. *Front Oncol.* 2020;10:580605. doi: 10.3389/fonc.2020.580605. [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
2. López-Pousa A, Broto JM, Garrido T, Vázquez J. Giant cell tumour of bone: New treatments in development. *Clin. Transl. Oncol.* 2015;17:419-430. doi: 10.1007/s12094-014-1268-5. [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
3. Verschoor AJ, Bovée J, Mastboom MJL, Sander Dijkstra PD, Van De Sande MAJ, Gelderblom H, et al. Incidence and demographics of giant cell tumour of bone in the Netherlands: First nationwide pathology registry study. *Acta Orthop.* 2018;89(5):570-574. doi: 10.1080/17453674.2018.1490987 [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
4. Deventer N, Budny T, Gosheger G, Rachbauer A, Puetzler J, Theil JC, et al. Giant Cell Tumor of Bone: A Single Center Study of 115 cases. *J. Bone Oncol.* 2022;33:100417. doi: 10.1016/j.jbo.2022.100417. [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
5. Alberghini M, Kliskey K, Krenacs T, et al. Morphological and immunophenotypic features of primary and metastatic giant cell tumour of bone. *Virchows Arch.* 2010;456(1):97-103. doi: 10.1007/s00428-009-0863-2 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
6. van der Heijden L, Dijkstra PDS, van de Sande MAJ, et al. The clinical approach toward giant cell tumor of bone. *Oncologist.* 2014;19(5):550-561. doi: 10.1634/theoncologist.2013-0432 [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
7. Zou C, Lin T, Wang B, et al. Managements of giant cell tumor within the distal radius: A retrospective study of 58 cases from A single center. *J Bone Oncol.* 2019;14:100211. doi: 10.1016/j.jbo.2018.100211 [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
8. Abuhejleh H, Wunder JS, Ferguson PC, et al. Extended intralesional curettage preferred over resection-arthrodesis for giant cell tumour of the distal radius. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2020;30(1):11-17. doi: 10.1007/s00590-019-02496-2 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
9. Chawla S, Blay J-Y, Rutkowski P, et al. Denosumab in patients with giant-cell tumour of bone: a multicentre, open-label, phase 2 study. *Lancet Oncol.* 2019;20(12):1719-1729. doi: 10.1016/S1470-2045(19)30663-1 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
10. Puri A, Gulia A, Hegde P, et al. Neoadjuvant denosumab: its role and results in operable cases of giant cell tumour of bone. *Bone Joint J.* 2019;101-B(2):170-177. doi: 10.1302/0301-620X.101B2.BJJ-2018-0907.R2. PMID: 30700112. [PubMed] [Google Scholar]
11. Palmerini E, Picci P, Reichardt P, Downey G. Malignancy in Giant Cell Tumor of Bone: A Review of the Literature. *Technol Cancer Res Treat.* 2019 Jan 01;18:1533033819840000. [PMC free article] [PubMed]
12. Chan CM, Adler Z, Reith JD, Gibbs CP Jr. Risk factors for pulmonary metastases from giant cell tumor of bone. *J Bone Joint Surg Am.* 2015;97(5):420-8. doi: 10.2106/JBJS.N.00678. PMID: 25740033. [PubMed] [Google Scholar]
13. Tsukamoto S, Mavrogenis AF, Leone G, Righi A, Akahane M, Tanzi P, et al. Denosumab does not decrease the risk

of lung metastases from bone giant cell tumour. *Int. Orthop.* 2019;43:483-489. doi: 10.1007/s00264-018-4085-6. Erratum in: 2019, 43, 491. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

14. Scoccianti G, Totti F, Scoranz M, Baldi G, Roselli G, Beltrami G, et al. Preoperative Denosumab With Curettage and Cryotherapy in Giant Cell Tumor of Bone: Is There an Increased Risk of Local Recurrence? *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2018;476:1783-1790. doi: 10.1007/s11999-000000000000104. [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

15. Zhao Y, Cai Z, Tang X, Du Z, Yang Y, Guo W. Preoperative Denosumab may increase the Risk of Local Recurrence of Giant-cell Tumor of Bone Treated with Curettage: A Systematic Review and Meta-analysis. *J. Cancer.* 2021;12:508-517. doi: 10.7150/jca.50575. [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

16. Saikia KC, Borgohain M, Bhuyan SK, Goswami S, Bora A, Ahmed F. Resection-reconstruction arthroplasty for giant cell tumor of distal radius. *Indian J Orthop.* 2010;44(3):327-32. 10.4103/0019-5413.65134. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

17. Maruthainar N, Zambakidis C, Harper G, Calder D, Cannon SR, Briggs TW. Functional outcome following excision of tumours of the distal radius and reconstruction by autologous non-vascularized osteoarticular fibula grafting. *J Hand Surg Br.* 2002;27(2):171-4. 10.1054/jhsb.2001.0707. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

18. Mozaffarian K, Modjallal M, Vosoughi AR. Treatment of giant cell tumor of distal radius with limited soft tissue invasion: Curettage and cementing versus wide excision. *J Orthop Sci.* 2018;23(1):174-179. 10.1016/j.jos.2017.10.001 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

19. Qu H, Guo W, Li D, Yang Y, Wei R, Xu J, et al. Functional results of wrist arthrodesis versus arthroplasty with proximal fibula following giant cell tumour excision of the

distal radius. *J Hand Surg Eur Vol.* 2019;44(4):394-401. 10.1177/1753193418809785 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

20. Wang B, Wu Q, Liu J, Chen S, Zhang Z, Shao Z, et al. What are the functional results, complications, and outcomes of using a custom unipolar wrist hemiarthroplasty for treatment of grade III giant cell tumors of the distal radius? *Clin Orthop Relat Res.* 2016;474(12):2583-2590. 10.1007/s11999-016-4975-0 [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

21. Barik S, Jain A, Ahmad S, Singh V. Functional outcome in giant cell tumor of distal radius treated with excision and fibular arthroplasty: a case series. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2020;30(6):1109-17. doi: 10.1007/s00590-020-02679-2. PMID: 32358713. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

22. Bianchi G, Sambri A, Marini E, et al. Wrist arthrodesis and osteoarticular reconstruction in giant cell tumor of the distal radius. *J Hand Surg Am.* 2020;45(9):882. doi: 10.1016/j.jhsa.2020.03.005. PMID: 32312541. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

23. Enneking WF, Dunham W, Gebhardt MC, Malawar M, Pritchard DJ. A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system. *Clin Orthop Relat Res.* 1993;286:241-246. 10.1097/00003086-199301000-00035 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

24. Saini R, Bali K, Bachhal V, Mootha AK, Dhillon MS, Gill SS. En bloc excision and autogenous fibular reconstruction for aggressive giant cell tumor of distal radius: a report of 12 cases and review of literature. *J Orthop Surg Res* 2011;6:14: doi: 10.1186/1749 799X 6 14 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

Отримано/Received 07.09.2025

Рецензовано/Revised 20.09.2025

Прийнято до друку/Accepted 17.10.2025

Information about authors

Volodymyr V. Protsenko, MD, DSc, PhD, Professor, Leading Research Fellow, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: ip15@ukr.net; phone: +380 (67) 476-81-20, +380 (50) 380-37-81; https://orcid.org/0000-0001-8896-8371

Olexandr A. Burianov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kaftraum@ukr.net; fax: +380 (44) 288-01-26; phone: +380 (67) 796-68-76; https://orcid.org/0000-0002-2174-1882

Volodymyr S. Chorny, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: oncoortoped@gmail.com; phone: +380 (96) 255-52-44; https://orcid.org/0000-0002-3679-0783

Andrii S. Kukharuk, PhD-student, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kaftraum@ukr.net; https://orcid.org/0009-0005-1841-2462
Yevhen O. Solonitsyn, PhD in Medicine, Orthopedist-Traumatologist, Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: g_solo@ukr.net; phone: +380 (50) 934-28-81; https://orcid.org/0000-0001-7057-1405

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. No benefits in any form have been received and will not be received from a commercial party related directly or indirectly to the subject matter of this article.

Ethical norms. This study was approved by the Bioethical Review and Research Ethics Commission at the Bogomolets National Medical University, informed consent to participate in the study was obtained from adult patients who were treated in the clinical departments of the State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", the authors are responsible for all aspects of the work, guaranteeing proper research and resolving issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

Authors' contribution. A.S. Kukharuk — conceived, designed and conducted the research; Ye.O. Solonitsyn — analyzed and interpreted clinical data; V.S. Chorny, O.A. Burianov — prepared the manuscript; V.V. Protsenko — reviewed and edited the manuscript. All listed authors made significant intellectual contributions to the work and approved it for publication.

V.V. Protsenko¹, O.A. Burianov², V.S. Chorny², A.S. Kukharuk², Ye.O. Solonitsyn¹

¹Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

²Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Giant cell tumour of the distal radius: outcomes of surgical treatment

Abstract. Background. Giant cell tumour (GCT) of the distal radius is a benign, locally aggressive bone tumour characterized by frequent recurrences and certain metastatic potential. Intramedullary or segmental resection of the distal radius affected by GCT

results in a defect in the distal radial segment. Main surgical reconstruction techniques for such defects include the use of spongy allo- and autografts, synthetic materials, polymethylmethacrylate, vascularized and non-vascularized bone autografts, osteoarticu-

lar allografts, and custom-made endoprotheses. In this study, we evaluated the oncological, surgical, and functional outcomes of distal radius GCT with different surgical interventions and reconstruction methods. Objective: surgical excision of distal radius giant cell tumour, reduction of tumour recurrence risk, and preservation of wrist joint function. **Materials and methods.** Surgical treatment was performed in 21 patients with distal radius GCT. Their mean age was 28.7 years (range: 18–39 years). Eight patients (38.1 %) with Campanacci grade II/III distal radius GCT underwent resection of the distal radial segment followed by reconstruction using a non-vascularized proximal fibular autograft fixed to the remaining radius with a plate or cerclage wires. Seven patients (33.3 %) with Campanacci grade I GCT underwent intramedullary resection and defect reconstruction using bioactive glass-based biocomposite material or spongy autograft. One patient (4.8 %) with Campanacci grade II GCT and 2 patients (9.5 %) with recurrent tumours underwent intramedullary resection and reconstruction with polymethylmethacrylate (bone cement). Two patients (9.5 %) with Campanacci grade III GCT and 1 patient (4.8 %) with repeated recurrences underwent segmental bone resection with defect replacement using a proximal fibular autograft, along with wrist arthrodesis. **Results.** The average follow-up period was 5.5 years (range: 2.8–11.2 years). Complications occurred in 3 patients (14.3 %), all involving dislocation of the fibular autograft in the wrist joint, which was corrected by revision surgery. Tumour recurrence was detected in 3 patients (14.3 %). In the first case, after intramedullary resection and bioactive glass-based reconstruction, the tumour was re-excised, the material removed, and the defect reconstructed with bone cement. In the second case, recurrence occurred after intramedullary resection and spongy autografting, requiring cement reconstruction. In the third case, after recurrence following

cement reconstruction, a distal radial resection with arthrodesis using a fibular autograft and plate osteosynthesis was performed. Functional outcomes of the upper limb after organ-preserving surgeries for distal radius GCT according to the MSTs scale averaged: 98.52 % (97.7–99.9 %) after bioactive glass or spongy autograft reconstruction, and 89.34 % (78.6–92.5 %) after resection and fibular autograft reconstruction. Functional outcomes were assessed in all 21 patients: excellent in 5 (23.8 %), good in 10 (47.6 %), and satisfactory in 6 (28.6 %). The average union time at the fibular-radial junction using a non-vascularized fibular autograft was 7.5 months (range: 3.2–16.1 months). The mean grip strength of the operated limb was 50 % (35–69 %) of the unaffected side, averaging 15 kg compared to 30 kg on the opposite side. The average range of motion included: forearm supination — 47° (31–69°), forearm pronation — 33° (16–55°), palmar flexion of the wrist — 40° (18–67°), dorsal extension of the wrist — 29° (11–52°), during combined movements — 151° (75–180°). Overall, 59 % (24–70 %) of the total motion range was preserved on the operated side compared to the normal side. A total of 85.7 % of patients were satisfied with the treatment outcomes. **Conclusions.** Intramedullary resection of distal radius GCT with defect reconstruction using various grafting materials is the preferred method for Campanacci grade I. Resection of the distal radial segment with fibular autograft reconstruction is effective for grade II/III tumours. Cement reconstruction is the method of choice in recurrent GCT. Wrist arthrodesis using autograft and plate osteosynthesis is preferred in cases of recurrent wrist instability. Tumour recurrence is associated with insufficient ablative and radical excision. Complications after organ-preserving surgery for distal radius GCT are linked to non-compliance with post-operative recommendations.

Keywords: giant cell tumour; radius; distal segment; combined treatment; surgical treatment; limb function; tumour recurrence

Полулях Д.М., Герасименко С.І., Полулях М.В., Герасименко А.С., Бабко А.М., Остапчук Р.М.

ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Септична та асептична нестабільність ендопротеза колінного суглоба у хворих на ревматоїдний артрит (метааналіз)

Резюме. Актуальність. Ендопротезування колінного суглоба є ефективним методом лікування хворих на ревматоїдний артрит. Проте на функціональні результати лікування суттєво впливає виникнення таких серйозних ускладнень, як септична та асептична нестабільність імплантатів. У цьому огляді узагальнено сучасні уявлення про патогенез, клінічні прояви, діагностику, стратегії профілактики та лікування нестабільності ендопротезів у хворих на ревматоїдний артрит. **Мета:** провести метааналіз сучасних клінічних досліджень щодо частоти, факторів ризику, діагностики та лікування септичної та асептичної нестабільності ендопротеза колінного суглоба у хворих на ревматоїдний артрит. **Матеріали та методи.** Проведено систематичний пошук досліджень у базах даних PubMed, Scopus та Web of Science за період 2010–2024 рр. До аналізу включено 16 досліджень, що відповідали критеріям включення. Оцінено відносний ризик (RR) розвитку нестабільності, частоту ускладнень, гетерогенність результатів. Аналіз виконано з використанням RevMan 5.4. **Результати.** Частота септичної нестабільності у хворих на ревматоїдний артрит становить 3,4 % (95% ДІ: 2,6–4,5), що у 2,1 рази (95% ДІ: 1,5–2,9) перевищує ризик у пацієнтів з остеоартрозом. Асептична нестабільність відзначена у 10,8 % (95% ДІ: 8,5–13,4) випадків. Основними факторами ризику є вік понад 65 років (RR = 1,7), ІМТ > 30 (RR = 1,9) та тривале застосування стероїдів (RR = 2,2). **Висновки.** Хворі на ревматоїдний артрит мають підвищений ризик розвитку нестабільності колінного ендопротеза. Використання персоналізованих протоколів профілактики та ревізійного протезування дає змогу знизити частоту ускладнень.

Ключові слова: ревматоїдний артрит; тотальне ендопротезування; септична нестабільність; асептична нестабільність; метааналіз

Ревматоїдний артрит (РА) є хронічним запальним захворюванням, що часто вимагає ортопедичних втручань у зв'язку з прогресуючою деструкцією суглобів. Тотальне ендопротезування колінного суглоба (ТЕКС) поліпшує якість життя, однак у хворих на РА частіше виникають ускладнення, ніж у хворих на остеоартроз, зокрема септична та асептична нестабільність імплантату.

Метою цього дослідження є систематичний аналіз наявної літератури з метааналізом результатів щодо частоти та чинників ризику нестабільності колінного ендопротеза у хворих на РА.

Матеріали та методи

Здійснено пошук інформації у PubMed, Scopus, Web of Science за ключовими словами: rheumatoid arthritis, total knee arthroplasty, septic loosening, aseptic loosening, prosthetic joint infection, meta-analysis протягом 2010–2024 рр. Були проаналізовані джерела, які відповідали критеріям включення: оригінальні клінічні дослідження, метааналізи, оглядові публікації щодо ускладнень після тотального ендопротезування колінного суглоба у хворих на РА (табл. 1). Для аналізу частоти подій використовували метод метааналізу з обчисленням відносного ризику (RR) та 95% довірчих інтервалів (ДІ).

Статистичну обробку здійснено за допомогою програмного забезпечення RevMan 5.4. З метою оцінки якості застосовували шкалу Newcastle-Ottawa.

Статистичний аналіз проведено з використанням RevMan 5.4. Розраховано відносний ризик із 95% довірчими інтервалами, гетерогенність оцінено за I^2 . При значенні $I^2 > 50\%$ використовували модель випадкових ефектів.

Результати

Проведено систематичний пошук досліджень у базах даних PubMed, Scopus та Web of Science за період 2010–2024 рр. До аналізу включено 16 досліджень, що відповідали критеріям включення. Оцінено відносний ризик розвитку нестабільності, частоту ускладнень, гетерогенність результатів (рис. 1, 2).

Таблиця 1. Характеристики включених досліджень

№	Автор (рік)	Дизайн	Кількість пацієнтів з РА	Середній вік (роки)	Септична нестабільність (%)	Асептична нестабільність (%)
1	Goodman (2020)	Когортне	250	67	3,5	9,0
2	Kapadia (2016)	Когортне	340	65	3,2	10,5
3	Kunutsor (2018)	Когортне	1200	66	2,8	11,0
4	Lenguerrand (2018)	Когортне	950	68	4,1	10,8
5	Mahmud (2015)	Когортне	400	64	3,7	9,8
6	Mikuls (2014)	Когортне	870	65	2,9	10,2
7	Ravi (2014)	Когортне	310	66	3,0	10,0
8	Tande (2014)	Когортне	610	63	3,8	11,3
9	Tsukada (2017)	Когортне	520	69	4,5	12,0
10	Zmistowski (2011)	Когортне	700	64	3,1	10,1
11	Boyko (2023)	Ретросп.	120	65	3,6	11,5
12	Hrytsenko (2024)	Ретросп.	80	62	3,0	9,9
13	Ivashchenko (2022)	Ретросп.	150	66	2,7	10,6
14	Kovalchuk (2022)	Ретросп.	100	67	3,3	9,7
15	Shevchuk (2021)	Ретросп.	110	64	3,4	10,3
16	Sydorenko (2023)	Ретросп.	130	65	3,1	10,1

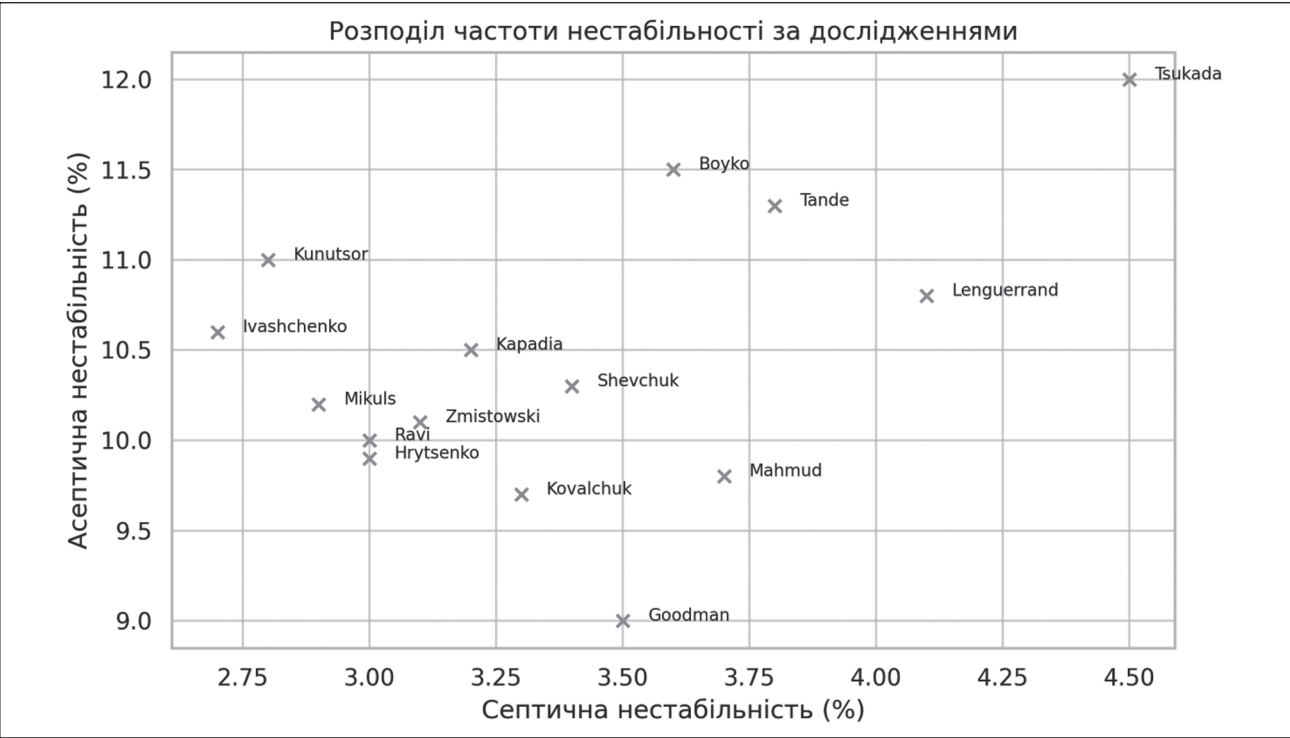


Рисунок 1. Розподіл частоти нестабільності за дослідженнями

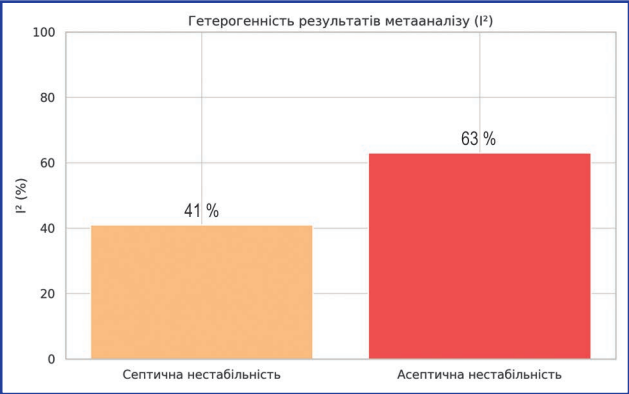


Рисунок 2. Гетерогенність результатів метааналізу

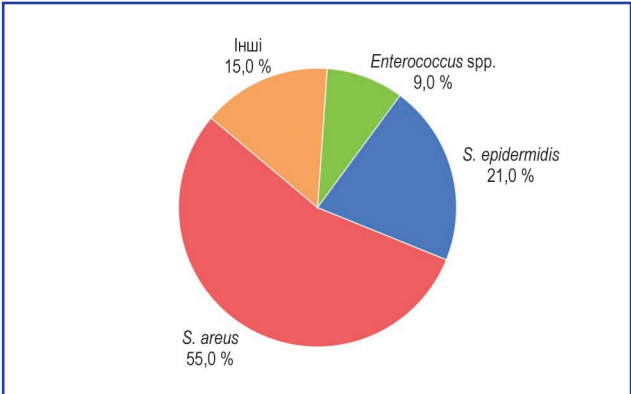


Рисунок 3. Поширені збудники при септичній нестабільності

Септична нестабільність виникає внаслідок інфікування перипротезного простору. Найчастішими патогенами є *Staphylococcus aureus* (45–60 % випадків), *Staphylococcus epidermidis* (15–30 %) та інші умовно-патогенні мікроорганізми (рис. 3).

Причинами септичної нестабільності є: розвиток інфекційного процесу навколо імплантату, формування біоплівки на його поверхні, остеоліз кісткової тканини внаслідок хронічного запалення [1–3, 5, 6].

Ускладнення після тотального ендопротезування колінного суглоба у хворих на ревматоїдний артрит трапляються значно частіше, ніж у пацієнтів з остеоартрозом (рис. 4). Це стосується як септичної, так і асептичної нестабільності імплантатів, що підтверджується даними сучасних метааналізів та великих когортних досліджень.

Згідно з результатами узагальненого аналізу досліджень за період 2010–2024 рр., частота септичної нестабільності після тотального ендопротезування у пацієнтів із РА становить приблизно 3,4 % (95% ДІ: 2,6–4,5), тоді як серед пацієнтів з остеоартрозом вона сягає лише 1,6 % (95% ДІ: 1,1–2,2). Це свідчить про майже дворазове зростання ризику розвитку інфекційних ускладнень у хворих на ревматоїдний артрит (RR = 2,1; 95% ДІ: 1,5–2,9).

Аналогічна ситуація спостерігається і щодо асептичної нестабільності. У пацієнтів з РА цей показник сягає 10,8 % (95% ДІ: 8,5–13,4), тоді як серед хворих на остеоартроз — 7,2 % (95% ДІ: 6,1–8,5). Відносний ризик розвитку асептичної нестабільності в осіб із ревматоїдним артритом становить 1,5 (95% ДІ: 1,2–1,9), що також вказує на статистично значуще підвищення частоти цього ускладнення.

Причини підвищеної частоти ускладнень у хворих на РА є багатофакторними. До основних чинників належать хронічне системне запалення, тривале застосування імуносупресивної терапії (особливо глюкокортикоїдів та біологічних препаратів), зниження якості кісткової тканини (остеопенія, остеопороз), анемія та гіпоальбумінемія. Також важливу роль відіграє імунна дисфункція, яка погіршує репаративні процеси у періопераційному періоді та знижує здатність до остеointegraції імплантатів.

За даними дослідження Lenguerrand et al. (2018), ризик ревізійного втручання через асептичну нестабільність протягом 10 років після первинного ендопротезування колінного суглоба становив 5,8 % у пацієнтів із РА, тоді як серед пацієнтів із остеоартрозом — лише 3,4 % (p < 0,001). Це додатково підтверджує наявність значущої різниці у прогнозі та післяопераційних наслідках у цих двох категорій хворих.

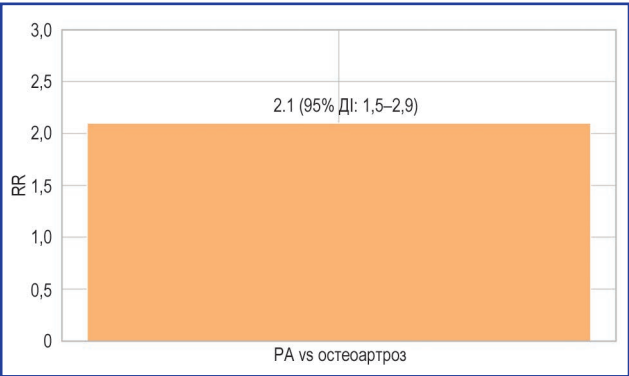


Рисунок 4. Відносний ризик септичної нестабільності при РА та остеоартрозі

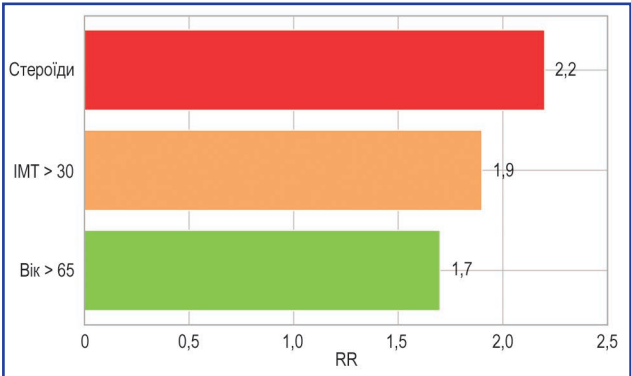


Рисунок 5. Фактори ризику асептичної нестабільності

Результати проведеного метааналізу свідчать, що ревматоїдний артрит є незалежним фактором ризику розвитку перипротезної інфекції з відносним ризиком 2,1 (95% ДІ: 1,5–2,9). Інфекційні ускладнення умовно поділяються на ранні (до 3 місяців після операції) та пізні (через 3 місяці і більше). Ранні інфекції зазвичай пов'язані з інтраопераційним зараженням або раннім післяопераційним періодом і можуть супроводжуватись локальним запаленням, виділенням ексудату, гіперемією. Пізні інфекції часто мають гематогенний характер або пов'язані з низьковірулентними бактеріями, проявляються через тривалий час після імплантації і нерідко супроводжуються хронічною нестабільністю [3].

Клінічно септична нестабільність проявляється болем, набряком, гіперемією, гіпертермією, формуванням нориць. Лабораторно відзначається підвищення рівнів СРБ (> 10 мг/л у 88 % випадків), ШОЕ, лейкоцитоз [1–3, 12, 16].

Асептична нестабільність пов'язана з механічним пошкодженням компонентів ендопротеза або остеолізом, викликаним імунною відповіддю на частки поліетилену, металу чи цементу. Причинами асептичної нестабільності можуть бути: механічне розхитування компонентів ендопротеза, недостатня фіксація імплантату, неправильне позиціонування компонентів, порушення зв'язкового балансу [4, 9, 11] (рис. 5).

Результати метааналізу наведені в табл. 2.

Недостатній рівень гемоглобіну (Hb) у пацієнтів, яким проводиться тотальне ендопротезування колінного суглоба, асоціюється зі зростанням ризику післяопераційних ускладнень, зокрема септичної нестабільності. За даними Kunutsor et al. (2018), анемія (Hb < 10 г/дл) є незалежним фактором ризику розвитку інфекцій у перипротезній зоні з відносним ризиком

1,8 (95% ДІ: 1,3–2,5) [3]. Оперативне втручання на тлі вираженої анемії сприяє зниженню імунної резистентності, поганому загоєнню ран, тривалій госпіталізації та підвищенню рівня реінфекцій. Зниження Hb у післяопераційному періоді також негативно впливає на репаративні процеси та функціональний результат. Таким чином, оптимізація рівня гемоглобіну до операції та підтримка його на адекватному рівні після хірургічного втручання є критично важливими профілактичними заходами.

Обговорення

За даними дослідження Lenguerand et al. (2018), ризик ревізії з приводу асептичної нестабільності через 10 років становить 5,8 % у хворих на РА проти 3,4 % у пацієнтів з остеоартрозом ($p < 0,001$) [4].

У хворих на ревматоїдний артрит із значно вираженою фронтальною деформацією часто виникає фронтальна нестабільність колінного суглоба. Це пов'язано з порушенням балансу зв'язкового апарату, особливо при втраті функціональної цілісності латеральних структур, що ускладнює досягнення стабільності після імплантації ендопротеза [7].

Окрему увагу слід приділити варусній деформації колінного суглоба, яка часто трапляється у хворих із тривалим перебігом РА. Варусне відхилення осі нижньої кінцівки спричиняє нерівномірний розподіл навантаження на медіальні відділи колінного суглоба, що призводить до передчасного зношування компонентів імплантату та розвитку асептичної нестабільності. Такі пацієнти мають підвищений ризик формування остеолізу у медіальному відділі та потребують індивідуалізованого підбору типу ендопротеза, зокрема застосування імплантатів із варіабельною фіксацією та вирівнюванням осі кінцівки під час операції. За дани-

Таблиця 2. Результати метааналізу

Параметр	Значення
Загальна кількість включених досліджень	16
Загальна кількість пацієнтів з РА	12 840
<i>Септична нестабільність</i>	
Об'єднана частота	3,4 % (95% ДІ: 2,6–4,5)
Відносний ризик (РА vs остеоартроз)	RR = 2,1 (95% ДІ: 1,5–2,9; $p < 0,001$)
Гетерогенність (I^2)	41 % (помірна)
<i>Асептична нестабільність</i>	
Об'єднана частота	10,8 % (95% ДІ: 8,5–13,4)
<i>Фактори ризику</i>	
Вік > 65 років	RR = 1,7 ($p = 0,02$)
Індекс маси тіла > 30	RR = 1,9 ($p = 0,01$)
Тривала терапія стероїдами	RR = 2,2 ($p = 0,003$)
Гетерогенність (I^2)	63 % (висока)
Publication bias*	Не виявлено

Примітка: * — *Publication bias: funnel plot не виявив значного ефекту публікаційної упередженості.*

ми окремих досліджень, варусна деформація збільшує ризик нестабільності в 1,6–1,8 раза, особливо при її величині понад 10° [17, 18].

Діагностика септичної нестабільності базується на клінічному огляді, лабораторних (СРБ, ШОЕ, про-кальцитонін), інструментальних (рентгенографія, УЗД, КТ) та мікробіологічних дослідженнях. Чутливість суглобової пункції з посівом у виявленні інфекції становить 80–92 % [7, 8, 12, 15, 16].

Асептична нестабільність виявляється через ознаки мікрорухомості імплантату, прогресуючий остеоліз, розмитість цементного шару. Сцинтиграфія з міченими лейкоцитами має специфічність понад 90 % при диференціації типу нестабільності [4, 9, 11, 16].

У лікуванні септичної нестабільності застосовується комплексний підхід: хірургічна санація рани, видалення імплантату, системна антибактеріальна терапія. У багатьох випадках між двома етапами ревізійного ендопротезування встановлюють цементний спейсер, який містить антибіотик і виконує тимчасову стабілізуючу функцію до моменту повторної імплантації. Позитивні результати після використання вказаної методики спостерігаються у 82–89 % випадків протягом п'яти років [7, 8, 12, 15, 16].

Асептична нестабільність потребує ревізійного протезування із застосуванням спеціалізованих імплантів з довгими ніжками, модульними компонентами та кістковою пластиною. Успішність ревізії без інфекційних ускладнень становить 91–96 % [4, 9, 11, 16].

Профілактика септичної та асептичної нестабільності включає попередню оцінку активності РА, тимчасову відміну біологічної терапії перед операцією, корекцію анемії, гіпоальбумінемії та діабету. Протокол антибіотикопрофілактики (наприклад, цефазолін 2 г за 30 хв до втручання) знижує ризик септичних ускладнень на 48 % [8]. Оцінка щільності кісткової тканини та медикаментозна профілактика остеопору (бісфосфонати, вітамін D) дає змогу зменшити ризик асептичної нестабільності майже на третину [9].

Так, визначено, що частота септичної нестабільності у пацієнтів з РА після тотального ендопротезування колінного суглоба за даними метааналізу становила 3,4 % (95% ДІ: 2,6–4,5), що у 2,1 раза (95% ДІ: 1,5–2,9; $p < 0,001$) перевищує показники у пацієнтів з остеоартрозом. Найбільш частими збудниками були *Staphylococcus aureus* (55 %), *Staphylococcus epidermidis* (21 %) та *Enterococcus* spp. (9 %). Частота асептичної нестабільності становила 10,8 % (95% ДІ: 8,5–13,4) з підвищеним ризиком у пацієнтів віком понад 65 років ($RR = 1,7$; $p = 0,02$), індексом маси тіла > 30 ($RR = 1,9$; $p = 0,01$) та тривалою терапією стероїдами ($RR = 2,2$; $p = 0,003$) [1–16].

Перипротезні переломи є ще одним серйозним ускладненням після тотального ендопротезування колінного суглоба. Їхня частота варіює від 0,3 до 2,5 % і зростає у пацієнтів похилого віку з остеопенією або при повторних хірургічних втручаннях. Причиною можуть бути механічні травми, нестабільність імплантату або технічні помилки під час операції [7].

Отримані результати підтверджують підвищений ризик ускладнень ТЕКС у хворих на РА. Імунодепресія, супутня стероїдна терапія та вік є ключовими факторами, які слід враховувати при плануванні операції. Своєчасна профілактика, модифікація ризиків та мультидисциплінарний підхід поліпшують результати.

Порівняння з іншими метааналізами свідчить про схожі результати, однак у цьому дослідженні додатково проаналізовано підгрупи ризику.

Висновки

Хворі на РА мають вищу частоту як септичної, так і асептичної нестабільності після ТЕКС. Частота септичної нестабільності у хворих на ревматоїдний артрит становить 3,4 % (95% ДІ: 2,6–4,5), що у 2,1 раза (95% ДІ: 1,5–2,9) перевищує ризик у пацієнтів з остеоартрозом. Асептична нестабільність відзначена у 10,8 % (95% ДІ: 8,5–13,4) випадків. Основними факторами ризику є вік понад 65 років ($RR = 1,7$), ІМТ > 30 ($RR = 1,9$) та тривале застосування стероїдів ($RR = 2,2$).

Профілактичні стратегії, засновані на персоналізованій оцінці ризиків, є критично важливими. Необхідні подальші проспективні дослідження для оптимізації підходів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Tortia R, Aloj DC, Borrè S, Rostagno R, Basile G, Leigh M. Periprosthetic Joint Infection: Current Concepts. *Chirurgia*. 2023 Dec;36(6):366–374. doi: 10.23736/S0394-9508.23.05652-8.
2. Kapadia BH, Berg RA, Daley JA, Fritz J, Bhav A, Mont MA. Periprosthetic joint infection. *Lancet*. 2016 Jan 23;387(10016):386–394. doi: 10.1016/S0140-6736(14)61798-0.
3. Ren X, Ling L, Qi L, et al. Patients' risk factors for periprosthetic joint infection in primary total hip arthroplasty: a meta-analysis of 40 studies. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021 Sep 12;22(1):776. doi: 10.1186/s12891-021-04647-1.
4. Barrett MC, Wilkinson FO, Blom AW, Whitehouse MR, Kunutsor SK. Incidence, temporal trends and potential risk factors for aseptic loosening following primary unicompartmental knee arthroplasty: A meta-analysis of 96,294 knees. *Knee*. 2021 Aug;31:28–38. doi: 10.1016/j.knee.2021.04.005.
5. Tsikopoulos K, Meroni G. Periprosthetic Joint Infection Diagnosis: A Narrative Review. *Antibiotics (Basel)*. 2023 Sep 27;12(10):1485. doi: 10.3390/antibiotics12101485.
6. Makimoto K, Konno R, Kinoshita A, Kanzaki H, Suto S. Incidence of severe infection in patients with rheumatoid arthritis taking biologic agents: a systematic review. *JBIS Evid Synth*. 2023 May 1;21(5):835–885. doi: 10.1112/JBIES-22-00048.
7. Ravi B, Croxford R, Hollands S, et al. Increased risk of complications following total joint arthroplasty in patients with rheumatoid arthritis. *Arthritis Rheumatol*. 2013 Nov;66(2):254–263. doi: 10.1002/art.38231.
8. Tande AJ, Patel R. Prosthetic joint infection. *Clin Microbiol Rev*. 2014 Apr;27(2):302–345. doi: 10.1128/CMR.00111-13.

9. Levent A, Suero EM, Gehrke T, Citak M. Risk Factors for Aseptic Loosening After Total Knee Arthroplasty with a Rotating-Hinge Implant: A Case-Control Study. *J Bone Joint Surg Am.* 2021 Mar 17;103(6):517-523. doi: 10.2106/JBJS.20.00788.
10. Rodriguez-Merchan EC, Delgado-Martinez AD. Risk Factors for Periprosthetic Joint Infection after Primary Total Knee Arthroplasty. *J Clin Med.* 2022 Oct 18;11(20):6128. doi: 10.3390/jcm11206128.
11. Sulima OM, Kalashnikov OV, Pidgaetskyi VM, Kozak RA, Nizalov TV. Some clinical factors of aseptic instability of the knee joint endoprosthesis. *Pain, Joints, Spine.* 2023;13(1):31-37. Ukrainian. doi: 10.22141/pjs.13.1.2023.355.
12. Obeidat K, Karpinska O. Osteoarthritis of the knee joint. Etiology, treatment, rehabilitation (analytical review of the literature). *Travma.* 2021;22(3):5-11. Ukrainian. doi: 10.22141/1608-1706.3.22.2021.236317.
13. Zazirnyi I, Barabash K. Modern trends in the developments of hip and knee arthroplasty. *Orthopaedics Traumatology and Prosthetics.* 2023;(4):70-78. doi: 10.15674/0030-59872021470-78.
14. Staude V, Arutunan Z, Radzishevskaya Y, Yaremenko O, Staude A. Complex rehabilitation treatment after knee arthroplasty. *Orthopaedics Traumatology and Prosthetics.* 2022;(1-2):12-19. doi: 10.15674/0030-598720221-212-19.
15. Fishchenko VO, Saleh OKJ, Karpinska OD. Biomechanical justification of rehabilitation measures after total knee replacement. *Travma.* 2022;23(1):66-71. Ukrainian. doi: 10.22141/1608-1706.1.23.2022.884.
16. Haiko HV, Pidhaitskyi VM, Sulyma OM, Chorny VM. Complications of revision knee arthroplasty. *Zaporozhye Medical Journal.* 2024 Jul 17;26(4):288-295. Ukrainian. doi: 10.14739/2310-1210.2024.4.298245.
17. Bellemans J, Colyn W, Vandenuecker H, Victor J. The Chitranjan Ranawat award: is neutral mechanical alignment normal for all patients? The concept of constitutional varus. *Clin Orthop Relat Res.* 2012 Jan;470(1):45-53. doi: 10.1007/s11999-011-1936-5.
18. Bonner TJ, Eardley WG, Patterson P, Gregg PJ. The effect of post-operative mechanical axis alignment on the survival of primary total knee replacements after a follow-up of 15 years. *J Bone Joint Surg Br.* 2011 Sep;93(9):1217-1222. doi: 10.1302/0301-620X.93B9.26573.

Отримано/Received 25.07.2025

Рецензовано/Revised 01.08.2025

Прийнято до друку/Accepted 07.08.2025

Information about authors

Dmytro Poluliakh, PhD in Medicine, Head of the Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: dmpoluliakh@gmail.com; phone: +380 (93) 914-57-63; <https://orcid.org/0000-0002-8895-6917>

Serhii Herasymenko, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: kievorto3@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6378-1196>

Mykhailo Poluliakh, MD, DSc, PhD, Professor, Chief Research Fellow, Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: orthoin.ua@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1698-8952>

Andrii Herasymenko, MD, DSc, PhD, Professor, Senior Research Fellow, Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: corado734@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-4895-499X>

Andrii Babko, MD, DSc, PhD, Professor, Senior Research Fellow, Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: orthokiev.i.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5919-5429>

Roman Ostapchuk, PhD in Medicine, Associate Professor, Research Fellow, Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: rostap4uk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8009-5879>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

D.M. Poluliakh, S.I. Herasymenko, M.V. Poluliakh, A.S. Herasymenko, A.M. Babko, R.M. Ostapchuk
Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

Septic and aseptic instability of knee endoprosthesis in patients with rheumatoid arthritis (meta-analysis)

Abstract. Background. Knee arthroplasty is an effective method for the treatment of patients with rheumatoid arthritis. However, the functional outcomes are significantly affected by serious complications such as septic and aseptic instability of implants. This review summarizes the current understanding of pathogenesis, clinical manifestations, diagnosis and strategies for the prevention and treatment of endoprosthesis instability in patients with rheumatoid arthritis. Aim: to conduct a meta-analysis of current clinical trials on the frequency, risk factors, diagnosis and treatment of septic and aseptic instability of knee endoprosthesis in patients with rheumatoid arthritis. **Materials and methods.** A systematic search of studies was conducted in the PubMed, Scopus and Web of Science databases for 2010–2024. The analysis included 16 studies that met the inclusion criteria. The relative risk (RR) of developing instability was esti-

mated, as well as the incidence of complications, and heterogeneity of results. The analysis was performed using RevMan 5.4. **Results.** The incidence of septic instability in patients with rheumatoid arthritis is 3.4 % (95% confidence interval (CI): 2.6–4.5), which is 2.1 times (95% CI: 1.5–2.9) higher than in participants with osteoarthritis. Aseptic instability was detected in 10.8 % (95% CI: 8.5–13.4) of cases. The main risk factors are age over 65 years (RR = 1.7), body mass index > 30 (RR = 1.9) and long-term use of steroids (RR = 2.2). **Conclusions.** Patients with rheumatoid arthritis have an increased risk of developing knee endoprosthesis instability. The use of personalized protocols for prevention and revision knee replacement can reduce the incidence of complications.

Keywords: rheumatoid arthritis; total joint replacement; septic instability; aseptic instability; meta-analysis

DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.6.26.2025.1052>

Долгополов О.В.¹, Безрученко С.О.¹, Зінченко В.В.¹, Суворов В.Л.¹, Карпінська О.Д.², Карпінський М.Ю.²

¹ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

²ДУ «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка НАМН України», м. Харків, Україна

Експериментальне дослідження стабільності металоостеосинтезу ключиці накістковими пластинами при переломі її акроміального кінця з дефектом кісткової тканини

Резюме. Актуальність. Бойові ушкодження ділянки надпліччя з переломами ключиці істотно відрізняються від травм мирного часу. Найбільш поширеним підходом до лікування незрощення ключиці є відкрита репозиція з фіксацією пластиною, розташованою по верхній поверхні кістки, у поєднанні з кістковою пластиною. Проте, за даними довгострокових досліджень, частота незрощення залишається на рівні 3, 1–10,5 %. **Мета:** вивчити стабілізуючі можливості варіантів остеосинтезу фрагментів ключиці при переломі на межі діяфіза та надплечового кінця з дефектом кісткової тканини. **Матеріали та методи.** Досліджували стабілізуючі можливості металоостеосинтезу ключиці накістковими пластинами при переломі на межі діяфіза та надплечового кінця ключиці із дефектом 2 см, який був заповнений трансплантатом відповідного розміру та фіксований гвинтами. Досліджували 2 варіанти остеосинтезу ключиці: однією пластиною та двома пластинами, у кожній групі по 5 зразків. Визначали величину переміщення фрагментів під впливом навантаження на згин у двох площинах — вертикальній і горизонтальній. Навантаження збільшували від 0 до 50 Н з кроком 10 Н. **Результати.** Остеосинтез ключиці однією пластиною забезпечує стабільну фіксацію фрагментів тільки у вертикальній площині, коли навантаження діє на її надплечовий кінець перпендикулярно площині накісткової пластини. У цьому випадку, щоб змістити надплечовий кінець, ключиця вимушена деформувати металеву накісткову пластину, яка має значні міцнісні властивості. Під впливом навантаження в горизонтальній площині спостерігали найвищі показники переміщення надплечового кінця ключиці. Це відбувається через те, що навантаження діє паралельно накістковій пластині і опір навантаження здійснюють тільки фіксуючі її гвинти, що виявляється недостатнім. Отже, недоліком остеосинтезу однією накістковою пластиною є те, що вона ефективно протидіє навантаженням тільки в одній площині. Остеосинтез ключиці двома накістковими пластинами, розташованими у взаємно перпендикулярних площинах, забезпечує стабільність її надплечового кінця під впливом як вертикальних, так і горизонтальних навантажень. Невелика різниця в показниках переміщення надплечового кінця ключиці між групами, які випробували під впливом вертикального і горизонтального навантаження, була викликана тільки фактором геометричних параметрів пластин. **Висновки.** Остеосинтез ключиці однією пластиною забезпечує стабільність її надплечового кінця тільки у вертикальній площині. Під впливом великих навантажень, що діють у горизонтальній площині, переміщення надплечового кінця ключиці можуть дорівнювати її діаметру в поперечному перерізі. Остеосинтез ключиці двома пластинами, розташованими у взаємно перпендикулярних площинах, забезпечує стабільність її надплечового кінця незалежно від напрямку дії навантаження.

Ключові слова: ключиця; перелом; металоостеосинтез; накісткова пластина; навантаження; переміщення

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2025

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2025

Для кореспонденції: Карпінський Михайло Юрійович, старший науковий співробітник, лабораторія біомеханіки, ДУ «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка НАМН України», вул. Григорія Сковороди, 80, м. Харків, 61024, Україна; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; tel.: +380 (67) 571-48-63

For correspondence: Mykhailo Yu. Karpinsky, Senior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Hryhoriya Skovorody st., 80, Kharkiv, 61024, Ukraine; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; phone: +380 (67) 571-48-63

Full list of authors information is available at the end of the article.

Вступ

Переломи ключиці належать до одних із найпоширеніших ушкоджень у цивільній травматології, їхня частка становить 5–11 % серед усіх переломів кісток скелета [1, 2]. Упродовж останніх десятиліть відбулись суттєві зміни традиційних принципів лікування переломів ключиці: хірургічні методи отримали чіткі показання, були значно вдосконалені й на сьогодні переважають у клінічній практиці [3]. Бойові ушкодження ділянки надпліччя з переломами ключиці становлять особливий клінічний інтерес, оскільки істотно відрізняються від травм мирного часу [4, 5]. За даними О.Є. Лоскутова, серед 1809 поранених військовослужбовців у 31,5 % були вогнепальні переломи, серед яких переломи лопатки і ключиці діагностували в 14,7 % пацієнтів [6]. Відомо, що частота незрощень ключиці після консервативного лікування становить 0,1–5 %, тоді як після оперативного лікування цей показник підвищується до 2,6–8 %. Незрощення ключиці може призвести до хронічного больового синдрому та стійкої втрати функції плечового суглоба [7]. Порівняно з гострими закритими переломами без дефекту кісткової тканини хірургічне лікування вогнепальних поліструктурних переломів ключиці, що супроводжуються дефектами кісткової, м'язової, сухожильної тканини та рубцевою трансформацією або дефектом шкіри, асоціюються з високим рівнем ускладнень і часто незадовільними клінічними результатами. Це становить суттєву проблему для ортопедів-травматологів [8]. Найбільш поширеним підходом до лікування незрощення ключиці є відкрита репозиція з фіксацією пластиною, розташованою по верхній поверхні кістки, у поєднанні з кістковою пластиною. Така тактика дає можливість раннього відновлення й у цілому забезпечує сприятливі результати [9, 10]. Проте, за даними довгострокових досліджень, частота незрощення залишається на рівні 3,1–10,5 %. Одним із пояснень таких невдач є механічна нестабільність між обома кінцями перелому [11, 12]. Тому метою нашого дослідження було порівняти стабілізуючі можливості різних методик фіксації переломів ключиці з дефектом кісткової тканини для оптимізації тактики хірургічного лікування пацієнтів із цим типом ушкоджень.

Мета: вивчити стабілізуючі можливості варіантів остеосинтезу фрагментів ключиці при переломі на межі діафіза та надплечового кінця з дефектом кісткової тканини.

Матеріали та методи

У лабораторії біомеханіки ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України» сумісно із співробітниками лабораторії біомеханіки ДУ «ІТО НАМН України» були проведені експериментальні дослідження стабілізуючих можливостей металоостеосинтезу ключиці накістковими пластинами при переломі на межі діафіза та надплечового кінця ключиці із дефектом 2 см, який був заповнений трансплантатом відповідного розміру та фіксований гвинтами. Експеримент проводили на пластикових моделях, на яких шляхом розпилю моделювали перелом із дефектом ключиці (рис. 1).

Досліджували два варіанти остеосинтезу: 1) S-подібна ключична блокуюча пластина 3,5 мм та 7 гвинтів (по 3 гвинти для фіксації проксимального й дистального фрагментів та 1 гвинт для фіксації трансплантату), фіксація проведена по верхній поверхні ключиці в горизонтальній площині; 2) дві пластини, фіксація у двох перпендикулярних площинах, горизонтальній та вертикальній (зверху і спереду): S-подібна ключична блокуюча пластина 3,5 мм та 7 гвинтів (по 3 гвинти для фіксації проксимального й дистального фрагментів та 1 гвинт для фіксації трансплантату) і попередньо змодельована блокуюча пряма пластина 2,4 мм та 7 гвинтів (по 3 гвинти для фіксації проксимального й дистального фрагментів та 1 гвинт для фіксації трансплантату) (рис. 2).

Дизайн експериментального дослідження наведено на рис. 3.

Як показано на схемі, вивчали 2 варіанти остеосинтезу ключиці: однією пластиною та двома пластинами, у кожній групі по 5 зразків. Визначали величину переміщення фрагментів ключиці під впливом навантаження в двох площинах — вертикальній (зверху вниз) і горизонтальній (спереду назад). Напрямок навантаження змінювали шляхом повороту зразка на 90°. Схеми навантаження наведено на рис. 4.

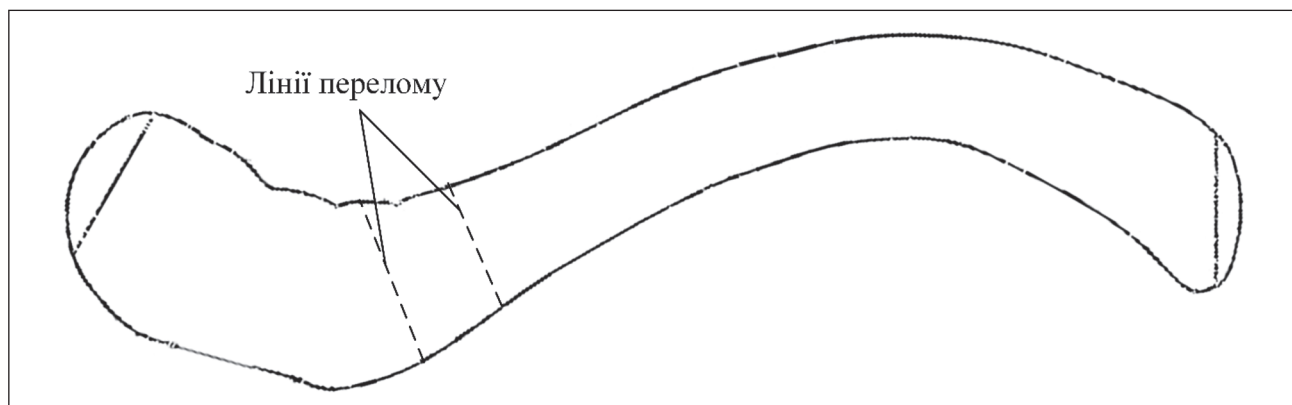


Рисунок 1. Схема моделювання перелому на межі діафіза та надплечового кінця ключиці

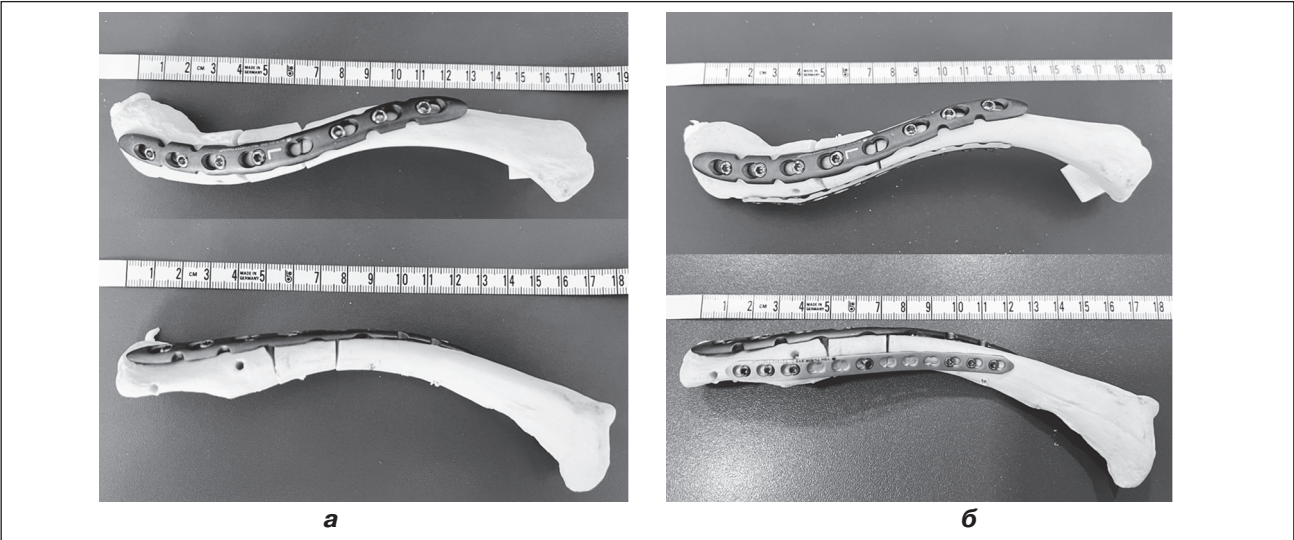


Рисунок 2. Варіанти остеосинтезу ключиці: а — однією пластиною; б — двома пластинами

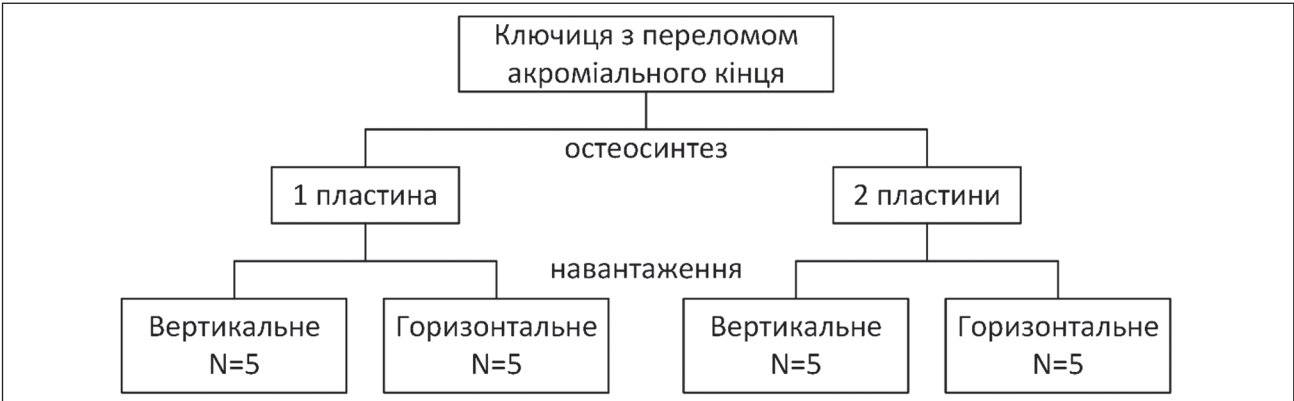


Рисунок 3. Дизайн експерименту

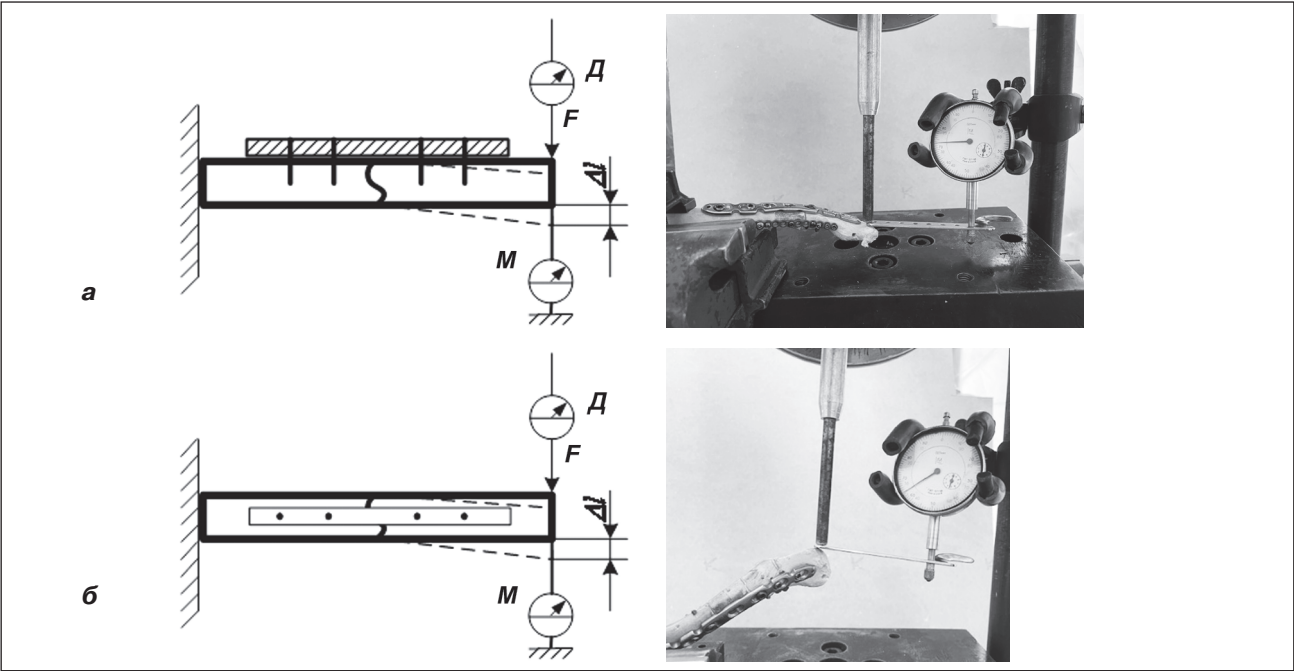


Рисунок 4. Схеми навантаження моделей: а — у вертикальній площині (зверху вниз); б — у горизонтальній площині (спереду назад)



Рисунок 5. Пристрій для фіксацій величини навантаження

При проведенні випробувань груднинний кінець ключиці жорстко закріплювали, навантаження прикладали до її надплечового кінця. Навантаження ступінчасто збільшували від 0 до 50 Н з кроком 10 Н. Вище навантаження не піднімали через те, що в деяких випадках величина переміщення надплечового кінця ключиці перевищувала межу вимірювання мікрометра 10,00 мм. Величину навантаження вимірювали за допомогою тензодинамометричного датчика SBA-100L, результати контролювали пристроєм реєстрації даних CAS типу CI-2001A (рис. 5).

На кожному кроці навантаження вимірювали величину переміщення Δl надплечового кінця ключиці за допомогою мікрометричного індикатора часового типу.

Дані були оброблені статистично. Для кожного кластера експерименту визначали середнє значення (M) та стандартне відхилення (SD). Для порівняння груп застосовували багатовимірний дисперсійний аналіз (MANOVA) з подальшим post-hoc тестом Duncan [13].

Результати

У результаті проведених експериментальних досліджень було отримано дані про величини переміщення фрагментів ключиці при різних варіантах їх остеосинтезу залежно від напрямку та величини навантаження, які після статистичної обробки мають вигляд, що наведений в табл. 1.

Графічно зміни величини переміщення надплечового кінця ключиці залежно від величини і напрямку навантаження при металоостеосинтезі однією пластиною наведено на рис. 6.

Як показали проведені випробування, при остеосинтезі ключиці з переломом на межі діафіза та надплечового кінця однією пластиною його стабільність залежить від напрямку дії навантаження. Якщо навантаження діє у вертикальному напрямку зверху вниз, тобто в площині, перпендикулярній площині пластины, переміщення надплечового кінця ключиці незначні і визначаються в межах від $0,30 \pm 0,04$ мм при навантаженні 10 Н до $3,24 \pm 0,13$ мм при навантаженні 50 Н. Тобто пластина досить ефективно протидіє такому навантаженню.

Зовсім інша картина спостерігається при навантаженні, що діє в горизонтальній площині, тобто в площині, паралельній площині пластины. Уже при мінімальній величині навантаження 10 Н переміщення надплечового кінця ключиці визначається на рівні $2,61 \pm 0,28$ мм, а при максимальному навантаженні 50 Н переміщення сягають позначки $9,70 \pm 0,32$ мм. Такий результат можна пояснити тим, що при вертикальному навантаженні спротив йому здійснює вся накісткова пластина. При горизонтальному навантаженні пластина практично не працює і фрагменти тримаються тільки на фіксуючих гвинтах.

Розглянемо, як поводить себе ключиця з переломом на межі діафіза та надплечового кінця ключиці із дефектом 2 см, заміщеним трансплантатом, при остеосинтезі двома накістковими пластинами, розташованими у взаємно перпендикулярних площинах. Графік, який наведений на рис. 7, надає уявлення про характер змін залежно від величини і напрямку навантаження.

Таблиця 1. Результати експериментальних досліджень переміщень фрагментів ключиці при різних варіантах їх остеосинтезу залежно від напрямку та величини навантаження

Навантаження		Переміщення, мм	
Напрямок	Величина, Н	1 пластина	2 пластины
Вертикальне	10	$0,30 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,02$
	20	$0,68 \pm 0,04$	$0,47 \pm 0,04$
	30	$1,09 \pm 0,06$	$0,70 \pm 0,06$
	40	$1,77 \pm 0,32$	$1,00 \pm 0,06$
	50	$3,24 \pm 0,13$	$2,16 \pm 0,16$
Горизонтальне	10	$2,61 \pm 0,28$	$0,33 \pm 0,10$
	20	$5,70 \pm 0,14$	$0,78 \pm 0,10$
	30	$7,32 \pm 0,11$	$1,17 \pm 0,13$
	40	$8,26 \pm 0,20$	$1,86 \pm 0,26$
	50	$9,70 \pm 0,32$	$3,36 \pm 0,21$

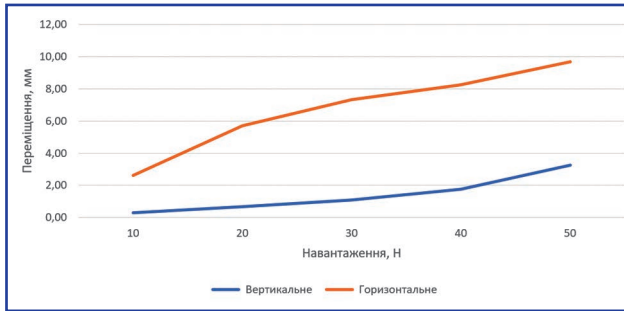


Рисунок 6. Графік величини переміщення надплечового кінця ключиці залежно від величини і напрямку навантаження при остеосинтезі однією пластиною

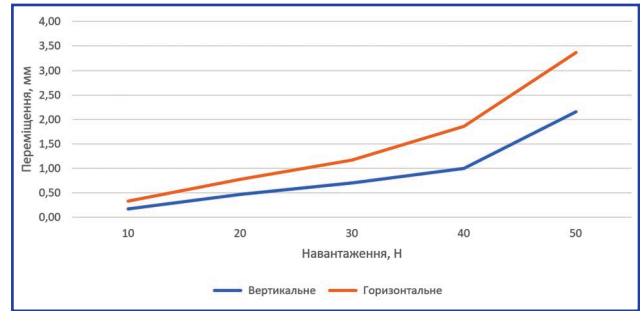


Рисунок 7. Графік величини переміщення акроміального кінця ключиці залежно від величини і напрямку навантаження при остеосинтезі двома пластинами

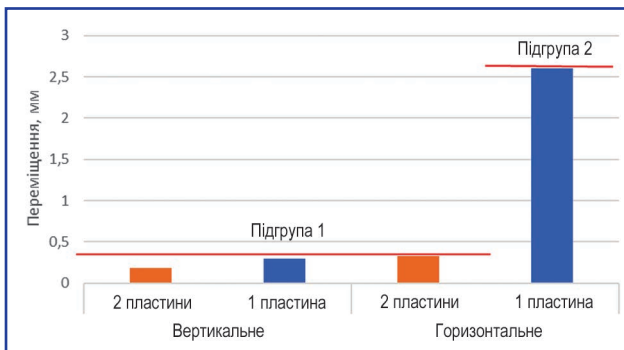


Рисунок 8. Діаграма розподілу величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 10 Н за критерієм статистично значущої різниці $\alpha = 0,05$

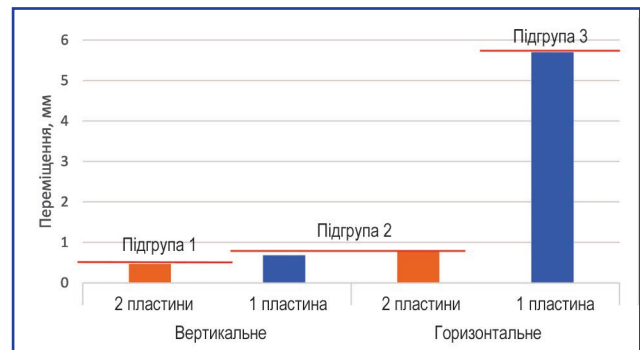


Рисунок 9. Діаграма розподілу величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 20 Н за критерієм статистично значущої різниці $\alpha = 0,05$

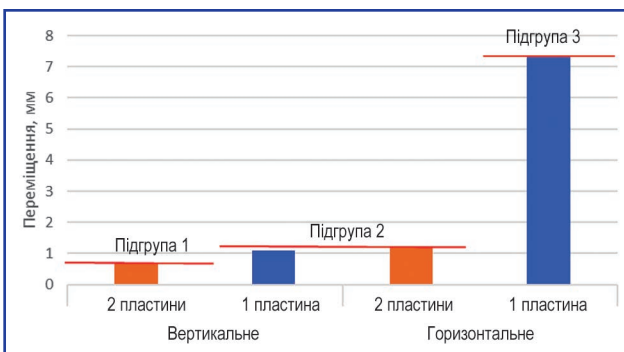


Рисунок 10. Діаграма розподілу величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 30 Н за критерієм статистично значущої різниці $\alpha = 0,05$

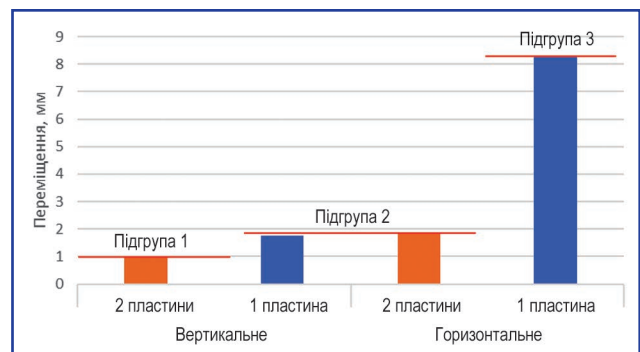


Рисунок 11. Діаграма розподілу величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 40 Н за критерієм статистично значущої різниці $\alpha = 0,05$

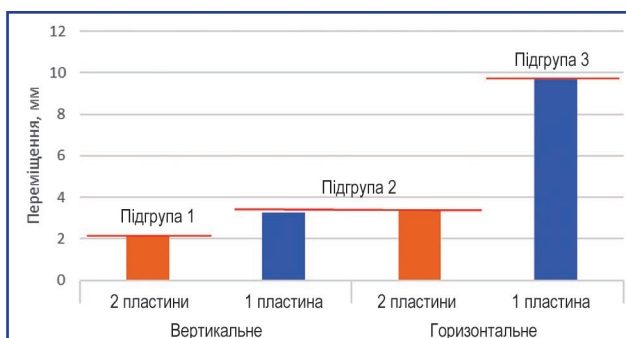


Рисунок 12. Діаграма розподілу величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 50 Н за критерієм статистично значущої різниці $\alpha = 0,05$

Остеосинтез ключиці двома пластинами показав зовсім інші результати випробувань. На графіку видно, що криві зміни величини переміщень залежно від напрямку дії навантаження розташовані практично паралельно, що свідчить про мінімальну залежність стабільності ключиці від напрямку дії згинаючої сили. Як бачимо, при навантаженні 10 Н різниця величин переміщення акроміального кінця ключиці мінімальна, в абсолютних значеннях вони становлять $0,18 \pm 0,02$ мм і $0,33 \pm 0,10$ мм при вертикальному та горизонтальному навантаженні відповідно. У міру підвищення навантаження величини переміщень надплечового кінця ключиці збільшуються до рівня $2,16 \pm 0,16$ мм при вертикальному навантаженні і до $3,36 \pm 0,21$ мм при горизонтальному. Різниця при цьому становить трохи більше ніж 1,00 мм. Це відбувається за рахунок того, що в цьому випадку опір як вертикальному, так і горизонтальному навантаженню здійснюють накісткові пластини. Різниця в показниках переміщень надплечового кінця ключиці виникає завдяки різниці геометричних розмірів пластин — бічна пластина значно тонше.

Наступним етапом роботи було проведено порівняльний аналіз виявлення статистично значущих різниць між показниками переміщення надплечового кінця ключиці залежно від варіанта остеосинтезу та напрямку навантаження. Дослідження виконували за допомогою багатофакторного дисперсійного аналізу MANOVA за тестом Duncan. Результати аналізу при навантаженні 10 Н наведені в табл. 2.

Результат проведеного дисперсійного аналізу показав, що при навантаженні 10 Н усі зразки ключиці, незалежно від напрямку навантаження і варіанта остеосинтезу, забезпечують однакову стабільність її надплечового кінця. Виняток становлять зразки з ос-

теосинтезом однією пластиною під впливом горизонтального навантаження, які з середнім показником величини переміщень 2,61 мм були віднесені в окрему підгрупу. Це означає, що вони з вірогідністю $p < 0,05$ відрізняються від інших зразків, які віднесені до першої підгрупи, що свідчить про відсутність статистично значущої різниці між ними ($p = 0,143$). Графічне зображення результатів дисперсійного аналізу наведено на рис. 8.

Табл. 3 відображає результати дисперсійного аналізу величин переміщень надплечового кінця ключиці під впливом навантажень 20 Н.

Підвищення величини навантаження до 20 Н надає можливість більшого відокремлення груп піддослідних зразків залежно від напрямку навантаження і варіанта остеосинтезу. Найкращий результат показали зразки з остеосинтезом двома пластинами під впливом вертикального навантаження із середнім показником зміщення акроміального кінця ключиці на 0,47 мм. Їх віднесення до першої підгрупи свідчить про те, що вони статистично значуще ($p < 0,05$) відрізняються від всіх інших досліджених зразків. Найгірший результат, в середньому 5,70 мм, показали зразки ключиці з остеосинтезом однією пластиною під впливом навантаження в горизонтальній площині. Вони також статистично значуще ($p < 0,05$) гірші за все інші варіанти, тому потрапили до третьої підгрупи. Група зразків з остеосинтезом однією пластиною під впливом вертикального навантаження (середній показник переміщення 0,68 мм) і група з остеосинтезом двома пластинами (0,78 мм) потрапили до однієї підгрупи 2, що означає відсутність статистично значущої різниці ($p = 0,104$) між ними. Але потрапляння їх до окремої підгрупи говорить про те, що вони статистично значущо ($p < 0,05$)

Таблиця 2. Результати багатофакторного дисперсійного аналізу MANOVA за тестом Duncan для різних варіантів остеосинтезу ключиці (переміщення під навантаженням 10 Н)

Навантаження	Остеосинтез	Підмножина для $\alpha = 0,05$	
		1	2
Вертикальне	2 пластини	0,18	–
	1 пластина	0,30	–
Горизонтальне	2 пластини	0,33	–
	1 пластина	–	2,61
Статистична значущість різниці, p		0,143	1,000

Таблиця 3. Результати багатофакторного дисперсійного аналізу MANOVA за тестом Duncan для різних варіантів остеосинтезу ключиці (переміщення під навантаженням 20 Н)

Навантаження	Остеосинтез	Підмножина для $\alpha = 0,05$		
		1	2	3
Вертикальне	2 пластини	0,47	–	–
	1 пластина	–	0,68	–
Горизонтальне	2 пластини	–	0,78	–
	1 пластина	–	–	5,70
Статистична значущість різниці, p		1,000	0,104	1,000

відрізняються і від групи з остеосинтезом двома пластинами при вертикальному навантаженні, і від групи з остеосинтезом однією пластиною при навантаженні в горизонтальній площині.

Наочне уявлення про розподіл величин переміщення надплечового кінця ключиці за критерієм статистичної значущості різниці надає діаграма, яка наведена на рис. 9.

Розглянемо, який вплив на величини переміщень надплечового кінця ключиці здійснило підвищення величини навантаження до 30 Н. Результати дисперсійного аналізу величин переміщень наведено в табл. 4.

При підвищенні величини навантаження до 30 Н, незважаючи на загальне підвищення величин переміщення надплечового кінця ключиці в усіх досліджених групах зразків ключиці, змін значущості різниці між групами не відбулося. Статистично значуще ($p < 0,05$) краще за всі інші групи виглядали зразки з остеосинтезом двома пластинами при вертикальному навантаженні (середня величина зміщення 0,70 мм). Гірше за всіх ($p < 0,05$) виглядали зразки з остеосинтезом однією пластиною під впливом горизонтального навантаження з показником 7,32 мм. Зразки з остеосинтезом однією пластиною під впливом навантаження у вертикальному напрямку з середнім показником 1,09 мм та зразки з остеосинтезом двома пластинами під впливом горизонтального навантаження — 1,17 мм показали практично однакові результати, про що свідчить показник значущості різниці $p = 0,184$.

У графічному вигляді результати дисперсійного аналізу наведені на діаграмі (рис. 10).

Як поведуть себе зразки ключиці при підвищенні навантаження до 40 Н залежно від варіанта остеосин-

тезу та напрямку навантаження, демонструють результати дисперсійного аналізу, які наведені в табл. 5.

Подальше підвищення величини навантаження до 40 Н також не призвело до перерозподілу значущості відмінностей між показниками величини переміщення надплечового кінця ключиці між різними групами зразків. Як і при попередній величині навантаження, статистично значущо ($p < 0,05$) за всі інші зразки найнижчу середню величину переміщення надплечового кінця ключиці 1,00 мм визначили в групі зразків з остеосинтезом двома пластинами під впливом вертикального навантаження. Статистично значущо ($p < 0,05$) найбільшу середню величину переміщення 8,26 мм спостерігали на зразках з остеосинтезом однією пластиною під впливом горизонтального навантаження. Групи зразків з остеосинтезом однією пластиною під навантаженням у вертикальній площині та з остеосинтезом двома пластинами під впливом горизонтального навантаження не мали статистично значущих відмінностей ($p = 0,545$).

Наочно порівняти величини переміщень надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 40 Н можна за допомогою діаграми, яка наведена на рис. 11.

Результати дисперсійного аналізу величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом максимального навантаження 50 Н наведені в табл. 6.

При максимальному використаному навантаженні 50 Н розподіл груп зразків за статистичною різницею середніх показників не змінився. Як раніше, найкращий ($p < 0,05$) показник 2,16 мм надали зразки з остеосинтезом двома пластинами під вертикальним навантаженням. Найгірші зразки з остеосинтезом однією пластиною під навантаженням в горизонтальній пло-

Таблиця 4. Результати багатофакторного дисперсійного аналізу MANOVA за тестом Duncan для різних варіантів остеосинтезу ключиці (переміщення під навантаженням 30 Н)

Навантаження	Остеосинтез	Підмножина для $\alpha = 0,05$		
		1	2	3
Вертикальне	2 пластини	0,70	–	–
	1 пластина	–	1,09	–
Горизонтальне	2 пластини	–	1,17	–
	1 пластина	–	–	7,32
Статистична значущість різниці, p		1,000	0,184	1,000

Таблиця 5. Результати багатофакторного дисперсійного аналізу MANOVA за тестом Duncan для різних варіантів остеосинтезу ключиці (переміщення під навантаженням 40 Н)

Навантаження	Остеосинтез	Підмножина для $\alpha = 0,05$		
		1	2	3
Вертикальне	2 пластини	1,00	–	–
	1 пластина	–	1,77	–
Горизонтальне	2 пластини	–	1,86	–
	1 пластина	–	–	8,26
Статистична значущість різниці, p		10,000	0,545	1,000

Таблиця 6. Результати багатофакторного дисперсійного аналізу MANOVA за тестом Duncan для різних варіантів остеосинтезу ключиці (переміщення під навантаженням 50 Н)

Навантаження	Остеосинтез	Підмножина для $\alpha = 0,05$		
		1	2	3
Вертикальне	2 пластини	2,16	–	–
	1 пластина	–	3,24	–
Горизонтальне	2 пластини	–	3,36	–
	1 пластина	–	–	9,70
Статистична значущість різниці, p		1,000	0,381	1,000

щині — 9,70 мм ($p < 0,05$). Групи з остеосинтезом однією пластиною під вертикальним навантаженням та з остеосинтезом двома пластинами під горизонтальним не мали статистично значущої різниці ($p = 0,381$).

Діаграма, яка наведена на рис. 12, надає наочне уявлення про співвідношення величин переміщення надплечового кінця ключиці під впливом навантаження 50 Н.

Обговорення

Проведені експериментальні дослідження показали, що остеосинтез ключиці однією пластиною забезпечує стабільну фіксацію фрагментів тільки у вертикальній площині, коли навантаження діє на її надплечовий кінець перпендикулярно площині накісткової пластини. У цьому випадку, щоб змістити надплечовий кінець, ключиця вимушена деформувати металеву накісткову пластину, яка має значні міцнісні властивості. Під впливом навантаження в горизонтальній площині спостерігаємо іншу картину, а саме найвищі показники переміщення надплечового кінця ключиці. Це відбувається через те, що навантаження діє паралельно накістковій пластині і опір навантаження здійснюють тільки фіксуючі її гвинти, що виявляється недостатнім. Отже, недоліком остеосинтезу однією накістковою пластиною є те, що вона ефективно протидіє навантаженням тільки в одній площині.

Остеосинтез ключиці двома накістковими пластинами, розташованими у взаємно перпендикулярних площинах, вирішує цю проблему. Проведені дослідження показали, що накладання пластин зверху і спереду ключиці забезпечує стабільність її надплечового кінця під впливом як вертикальних, так і горизонтальних навантажень. Невелика різниця в показниках переміщень надплечового кінця ключиці між групами, які випробували під впливом вертикального і горизонтального навантаження, була викликана тільки фактором геометричних параметрів пластин [14]. Пластина, яку накладали на бокову поверхню ключиці, була значно тонше пластини, накладеною зверху, отже, опір горизонтальним навантаженням був слабшим.

Висновки

Остеосинтез ключиці однією пластиною забезпечує стабільність її надплечового кінця тільки у вертикальній площині. Під впливом великих навантажень,

що діють у горизонтальній площині, переміщення надплечового кінця ключиці можуть дорівнювати її діаметру в поперечному перерізі.

Остеосинтез ключиці двома пластинами, розташованими у взаємно перпендикулярних площинах, забезпечує стабільність її надплечового кінця незалежно від напрямку дії навантаження.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Внесок авторів. Долгополов О.В. — остаточне затвердження статті; Безрученко С.О. — концепція та дизайн роботи; Зінченко В.В. — критичний огляд; Суворов В.Л. — збір та аналіз даних; Карпінська О.Д., Карпінський М.Ю. — збір та аналіз даних, написання статті.

Список літератури

1. Wolf, S., Chitnis, A.S., Manoranjith, A., Vanderkarr, M., Plaza, J.Q., Gador, L.V., et al. (2022). Surgical treatment, complications, reoperations, and healthcare costs among patients with clavicle fracture in England. *BMC musculoskeletal disorders*, 23(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05075-5>.

2. Saragaglia, D., & Refaie, R. (2021). Displaced mid-shaft clavicular fractures: state of the art for athletes and young active people. *International orthopaedics*, 45(10), 2679-2686. <https://doi.org/10.1007/s00264-021-05113-2>.

3. Hochreiter, B., Saager, L.V., Zindel, C., Calek, A.K., Stern, C., Wieser, K., & Gerber, C. (2023). Computer-assisted planning vs. conventional surgery for the correction of symptomatic mid-shaft clavicular nonunion and malunion. *JSES international*, 7(6), 2321-2329. <https://doi.org/10.1016/j.jseint.2023.07.005>.

4. Денисюк, М., Дубров, С., Черняєв, С., Середа, С., & Заїкін, Ю. (2022). Структура травматичних ушкоджень та досвід лікування поранених внаслідок бойових дій в перші дні нападу росії на Україну. *Pain, Anaesthesia & Intensive Care*, 1(98), 7-12. [https://doi.org/10.25284/2519-2078.1\(98\).2022.256092](https://doi.org/10.25284/2519-2078.1(98).2022.256092).

5. Strafyn, S., Kurinnyi, I., Borzykh, N., Tsymbaliuk, Y., & Shypunov, V. (2021). Tactics of Surgical Treatment of Wounded with Gunshot Injuries of the Upper Limb in Modern Conditions. *Terra Orthopaedica*, 2(109), 10-17. <https://doi.org/10.37647/0132-2486-2021-109-2-10-17>.

6. Loskutov, O., Zherdev, I., Domanskyi, A., Korol, S. (2022). Surgical Management of Gunshot Wounds of Extremities in Multiprofiled Hospital. *Trauma*, 21, 17(3), 169-72. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.17.2016.75804>.

7. Ma, T., Huang, Q., Wang, C., Ren, C., Xu, Y., Lin, H., et al. (2025). Comparing two autologous bone grafting techniques to treat clavicular midshaft atrophic nonunion: a retrospective study. *Journal of Orthopaedics and Traumatology: official journal of the Italian Society of Orthopaedics and Traumatology*, 26(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s10195-025-00828-z>.

8. Yetter, T., Harper, J., Weatherby, P.J., & Somerson, J.S. (2023). Complications and Outcomes After Surgical Intervention in Clavicular Nonunion: A Systematic Review. *JBJS reviews*, 11(1), e22.00171. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.22.00171>.

9. Cole, P.A., Dyskin, E., Dugarte, A.J., & Hesse, D. (2017). Open Reduction and Internal Fixation of a Middle-Third Clavicle Fracture with a Superior Plate. *JBJS Essential Surgical Techniques*, 7(2), e16. <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.16.00007>.

10. Sinkler, M.A., Wang, M., Kuo, A., Furdock, R.J., McMellen, C.J., Boes, K., & Ochenjele, G. (2023). Anterior and superior plate positions in diaphyseal clavicle fractures produce similar patient outcomes. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology: Orthopedie Trauma-*

tologie, 33(6), 2331-2336. <https://doi.org/10.1007/s00590-022-03428-3>.

11. Faraut, A., Bonneville, N., Allavena, C., Nouaille Degorce, H., Bonneville, P., & Mansat, P. (2014). Outcomes from surgical treatment of middle-third clavicle fractures nonunion in adults: a series of 21 cases. *Orthopaedics & Traumatology, Surgery & Research: OTSR*, 100(2), 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2013.09.011>.

12. Lim, S., Cho, E., Chun, J.M., & Jeon, I.H. (2022). Osteosynthesis with autologous dual bone graft for nonunion of midshaft clavicle fractures: clinical and radiological outcomes. *European Journal Of Orthopaedic Surgery & Traumatology: Orthopedie Traumatologie*, 32(1), 159-165. <https://doi.org/10.1007/s00590-021-02904-6>.

13. Ross, A., & Willson, V.L. (2018). *Basic and advanced statistical tests*. SensePublishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-6351-086-8>.

14. Павлов, О., Павлова, О., Мальцева, В., Карпінський, М., Карпінська, О. (2024). Експериментальне дослідження міцності накісткових пластин з композитного матеріалу на основі полілактиду, трикальційфосфату та гідроксипатиту. *Trauma*, 25(4), 142-5. DOI: 10.22141/1608-1706.4.25.2024.987.

Отримано/Received 03.09.2025

Рецензовано/Revised 16.09.2025

Прийнято до друку/Accepted 08.10.2025

Information about authors

Oleksii V. Dolhopolov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Severe Skeletal Trauma, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: poloff.a@gmail.com; phone: +380 (50) 358-05-65; <https://orcid.org/0000-0002-5204-6137>

Serhii O. Bezruchenko, PhD in Medicine, Head of the Department of Severe Skeletal Trauma, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: drbezruchenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1575-0344>

Vitalii V. Zinchenko, PhD in Medicine, Senior Research Fellow, Department of Severe Skeletal Trauma, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: vzinchenko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1081-3801>

Vasyl L. Suvorov, PhD in Medicine, Head of the Biomechanics Laboratory, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: vasil_suvorov@ukr.net; phone: +380 (66) 393-72-13; <https://orcid.org/0000-0002-0862-7997>

Olena D. Karpinska, Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: helen.karpinska@gmail.com; phone: +380 (57) 725-14-74, +380 (99) 486-34-63; <https://orcid.org/0000-0002-1482-7733>

Mykhailo Yu. Karpinsky, Senior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; phone: +380 (67) 571-48-63; <https://orcid.org/0000-0002-3004-2610>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. O.V. Dolhopolov — final approval of the article; S.O. Bezruchenko — concept and design of the work; V.V. Zinchenko — critical review; V.L. Suvorov — data collection and analysis; O.D. Karpinska, M.Yu. Karpinsky — data collection and analysis, article writing.

O.V. Dolhopolov¹, S.O. Bezruchenko¹, V.V. Zinchenko¹, V.L. Suvorov¹, O.D. Karpinska², M.Yu. Karpinsky²

¹Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

²Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine

Experimental study of the stability of osteosynthesis of the clavicle with bone plates in case of a fracture of its suprahumeral end with a bone tissue defect

Abstract. Background. Combat injuries of the suprahumeral region with clavicle fractures differ significantly from peacetime injuries. The most common approach to the treatment of clavicle nonunion is open reduction with fixation with a plate located on the upper surface of the bone, in combination with bone grafting. However, according to long-term studies, the frequency of nonunion remains at the level of 3.1–10.5 %. Objective: to study the stabilizing possibilities of the options for osteosynthesis of clavicle fragments in case of a fracture at the border of the diaphysis and the suprahumeral end with a bone tissue defect. **Materials and**

methods. The stabilizing possibilities of osteosynthesis of the clavicle with bone plates were studied in case of a fracture at the border of the diaphysis and the suprahumeral end of the clavicle with a 2 cm defect, which was filled with a graft of the appropriate size and fixed with screws. Two options for osteosynthesis of the clavicle were considered: with one plate and two plates, 5 samples in each group. There was determined the value of fragment movement under the influence of bending load in two planes — vertical and horizontal. The load was increased from 0 to 50 N in steps of 10 N. **Results.** Osteosynthesis of the clavicle with one plate provides sta-

ble fixation of fragments only in the vertical plane, when the load acts on its suprahumeral end perpendicular to the plane of the bone plate. In this case, in order to displace the suprahumeral end, the clavicle is forced to deform a metal bone plate, which has significant strength properties. Under the influence of a load in the horizontal plane, the highest rates of movement of the suprahumeral end of the clavicle were observed. This is due to the fact that the load acts parallel to the bone plate and the resistance to the load is provided only by its fixing screws, which turns out to be insufficient. Therefore, the disadvantage of osteosynthesis with one bone plate is that it effectively counteracts loads only in one plane. Osteosynthesis of the clavicle with two bone plates located in mutually perpendicular planes ensures stability of its suprahumeral end under the influence

of both vertical and horizontal loads. A small difference in the rates of movement of the suprahumeral end of the clavicle between the groups tested under the influence of vertical and horizontal loads was caused only by the factor of the geometric parameters of the plates.

Conclusions. Osteosynthesis of the clavicle with one plate provides stability of its suprahumeral end only in the vertical plane. Under the influence of large loads acting in the horizontal plane, the displacement of the suprahumeral end of the clavicle can be equal to its diameter in cross section. Osteosynthesis of the clavicle with two plates located in mutually perpendicular planes provides stability of its suprahumeral end regardless of the direction of the load.

Keywords: clavicle; fracture; osteosynthesis; bone plate; load; displacement

Нехлопочин О.С.¹, Вербов В.В.¹, Чешук Є.В.¹, Карпінський М.Ю.², Яресько О.В.²

¹ДУ «Інститут нейрохірургії імені академіка А.П. Ромоданова НАМН України», м. Київ, Україна

²ДУ «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка НАМН України», м. Харків, Україна

Напружено-деформований стан моделі грудопоперекового відділу хребта з переломом хребця Th12 типу А1 за короткої транспедикулярної фіксації: аналіз компресійного навантаження

Резюме. Актуальність. Переломи грудопоперекового переходу (Th11–L2) є одними з найчастіших ушкоджень хребта й нерідко призводять до формування посттравматичної деформації та неврологічних ускладнень. Найпоширенішим методом хірургічного лікування є коротка транспедикулярна фіксація, але досі не вирішені питання щодо необхідності залучення пошкодженого хребця в конструкцію, а також щодо оптимальної довжини гвинтів. **Мета:** оцінити напружено-деформований стан грудопоперекового відділу хребта при переломі хребця Th12 типу А1 за класифікацією AO Spine та визначити вплив довжини основних транспедикулярних гвинтів і наявності проміжних гвинтів у пошкодженому хребці при короткій фіксації на розподіл навантаження. **Матеріали та методи.** Побудовано тривимірну скінченно-елементну модель грудопоперекового відділу хребта (Th9–L5) на основі даних комп'ютерної томографії. Змодельовано перелом тіла хребця Th12 типу А1 за класифікацією AO Spine. Розглянуто чотири варіанти короткої транспедикулярної фіксації: короткі гвинти без проміжних, довгі гвинти без проміжних, короткі гвинти з проміжними в тілі хребця Th12, довгі гвинти з проміжними в тілі хребця Th12. Навантаження відповідало осьовому стисненню величиною 350 Н. Аналіз напруження виконували методом кінцевих елементів за критерієм Мізеса. **Результати.** Установлено, що розподіл напруження в тілах хребців суттєво не відрізнявся в моделях, коливання були лише 2–3 %. Базова чотиригвинтова фіксація забезпечувала достатнє розвантаження пошкодженого хребця. Введення проміжних гвинтів знижувало рівень напруження в основних гвинтах, особливо на рівні Th11, але супроводжувалося дворазовим збільшенням напруження в опорних стрижнях конструкції. Застосування довгих бікортікальних гвинтів помірно розвантажувало кісткові структури, але збільшувало навантаження в самих гвинтах, особливо на рівні L1. **Висновки.** При компресійних переломах типу А1 за наявності показань до хірургічного втручання коротка чотиригвинтова фіксація забезпечує достатню стабільність і мінімальне навантаження на ушкоджений хребець. Використання довгих гвинтів та додаткових проміжних гвинтів доцільне переважно при тяжких ушкодженнях, тоді як у разі простих компресійних переломів їх застосування не має значних біомеханічних переваг, але збільшує травматичність втручання.

Ключові слова: грудопоперековий перехід; перелом хребця Th12; компресійний перелом; транспедикулярна фіксація; проміжні гвинти; бікортікальні гвинти; скінченно-елементне моделювання

Вступ

Грудопоперековий перехід хребта є однією з найуразливіших зон хребтового стовпа щодо травматичних ушкоджень. Переломи на рівні Th11–L2 трапляються з високою частотою й можуть призвести до кіфотичної

деформації та неврологічних ускладнень за відсутності адекватної стабілізації [1]. Анатомічні особливості перехідної зони від кіфозу грудного відділу до лордозу поперекового відділу, реорієнтація фасеткових суглобів і втрата «реберної опори» каудальніше за хребець Th12

створюють передумови для концентрації механічних напружень і підвищеного ризику пошкоджень при осьових та згинальних навантаженнях [2, 3].

Для лікування переломів груднопоперекового переходу широко застосовують коротку задню транспедикулярну фіксацію, тобто установлюють гвинти в хребці, розташовані вище і нижче за рівень перелому, із монтажем сполучних балок. Ця хірургічна методика має суттєві переваги (збереження рухливості більшості сегментів хребта, відносна простота виконання). Однак у разі нестабільних переломів коротка фіксація може супроводжуватися втратою корекції та механічними ушкодженнями імплантатів [4].

Для підвищення жорсткості конструкції деякі хірурги рекомендують залучати пошкоджений хребець у систему фіксації, установлюючи додаткові проміжні гвинти в його тіло. Такий підхід передбачає використання системи з шести гвинтів замість традиційної чотиригвинтової конструкції [5]. Клінічні дослідження та метааналізи підтверджують, що додавання проміжних гвинтів підвищує стабільність фіксації, знижує ризик імплантат-асоційованих ускладнень, забезпечує краще збереження корекції та зменшує больовий синдром [6, 7]. Однак установка додаткових гвинтів супроводжується збільшенням тривалості оперативного втручання та підвищенням його інвазивності, що призводить до більшої крововтрати й потенційного збільшення ризику післяопераційних ускладнень [8]. Тому триває пошук оптимальної тактики лікування. Для цього необхідно з'ясувати, чи є коротка фіксація без проміжних гвинтів достатньою при стабільних переломах або слід завжди зміцнювати конструкцію додатковими гвинтами.

Дискусійним залишається питання щодо вибору довжини транспедикулярних гвинтів. Монокортикальні гвинти відносно короткі та фіксуються в межах тіла хребця, тоді як бікортикальні гвинти проходять крізь передню кортикальну пластинку тіла хребця. Припускають, що бікортикальні гвинти забезпечують надійнішу фіксацію за рахунок penetрації жорсткого кортикального шару передньої стінки хребця, але при цьому підвищується ризик пошкодження прилеглих, вентрально розташованих анатомічних структур [9, 10].

Біомеханічне моделювання дає змогу порівняти варіанти фіксації та оцінити розподіл напруження в елементах хребта й імплантатах за різних умов навантаження. У статті розглянуто клінічно значущу проблему — транспедикулярну фіксацію за травматичного пошкодження ділянки груднопоперекового переходу типу A1 за класифікацією AO Spine [11, 12].

Переломи типу A1 зазвичай супроводжуються мінімальними пошкодженнями опорного комплексу. У більшості випадків при неускладненому стабільному перебігу показано консервативне ведення з використанням зовнішньої іммобілізації та ранньої функціональної реабілітації [13]. Хірургічна стабілізація показана за наявності певних ознак: прогресування кіфотичної деформації, втрата висоти тіла хребця з порушенням сагітального балансу, виражений больовий синдром, а

також за наявності чинників ризику неспроможності консолідації [14, 15]. Такі втручання зазвичай виконують відстрочено, на етапах, коли вертебропластику або кіфопластику вже не можна розглядати як оптимальний метод лікування, а порушення сагітального балансу, що формується, потребує корекції із застосуванням саме транспедикулярної фіксації [16].

Мета: оцінити напружено-деформований стан груднопоперекового відділу хребта при переломі хребця Th12 типу A1 за класифікацією AO Spine та визначити вплив довжини основних транспедикулярних гвинтів і наявності проміжних гвинтів у пошкодженому хребці при короткій фіксації на розподіл навантаження.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами. Робота є фрагментом науково-дослідної роботи «Дослідити механізми та розробити комплекс лікувальних заходів для зменшення інвалідизації та поліпшення якості життя хворих з хребетно-спинно-мозковою травмою», державний реєстраційний номер 0119U000110.

Матеріали та методи

Дослідження виконано методом математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів. У лабораторії біомеханіки Інституту патології хребта та суглобів імені М.І. Ситенка НАМН України було розроблено тривимірну скінченно-елементну модель груднопоперекового відділу хребта (сегменти від Th9 до L5) із моделюванням пошкодження тіла хребця Th12 типу A1.

Геометричну модель хребта створено на основі даних комп'ютерної томографії здорового добровольця чоловічої статі. Процес побудови геометрії та визначення властивостей моделі описано в попередніх публікаціях авторів [17, 18]. Дискретизацію моделі виконано з використанням тетраедральних скінченних елементів із 10 вузлами та квадратичною апроксимацією функцій форми.

Для імітації транспедикулярного остеосинтезу моделі Th12 застосовано конструкцію з гвинтами у двох суміжних хребцях: Th11, розташованому вище за рівень перелому, і L1, розташованому нижче за рівень перелому. Досліджували чотири варіанти короткої фіксації двох суміжних хребців, які відрізнялися за наявністю або відсутністю додаткових гвинтів у переломаному хребці Th12, а також за довжиною основних гвинтів (рис. 1).

Перший варіант передбачав використання коротких монокортикальних гвинтів у хребцях Th11 та L1 без встановлення проміжних гвинтів у тіло хребця Th12, другий варіант — застосування довгих бікортикальних гвинтів у хребцях Th11 та L1 без встановлення проміжних гвинтів у тіло хребця Th12, третій варіант — використання коротких монокортикальних гвинтів у хребцях Th11 та L1 і двох додаткових коротких гвинтів у тілі хребця Th12, четвертий варіант — застосування довгих бікортикальних гвинтів у хребцях Th11 та L1 у поєднанні з двома додатковими короткими гвинтами в тілі хребця Th12.

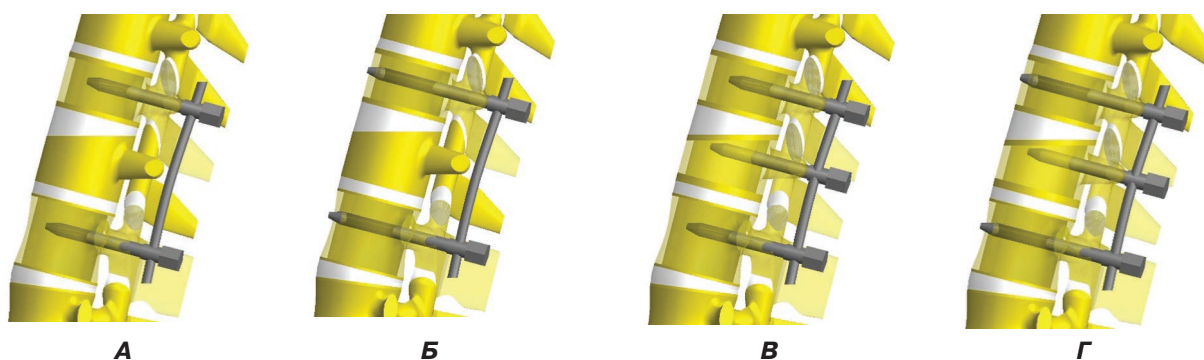


Рисунок 1. Моделі з різними варіантами транспедикулярної фіксації: А — короткі гвинти без проміжних; Б — довгі гвинти без проміжних; В — короткі гвинти із проміжними в тілі хребця Th12; Г — довгі гвинти із проміжними в тілі хребця Th12

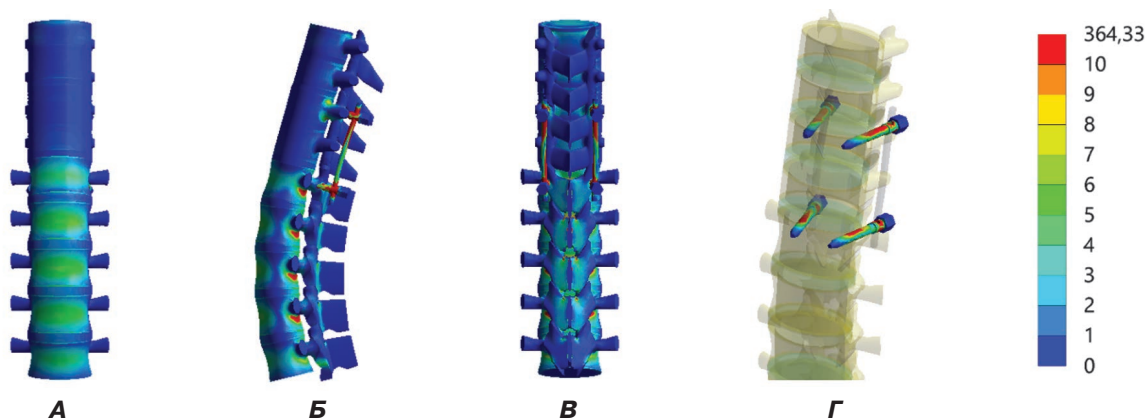


Рисунок 2. Розподіл напруження в моделі груднопоперекового відділу хребта з пошкодженням тіла хребця Th12 типу A1 під дією компресійного навантаження. Транспедикулярна фіксація короткими гвинтами без проміжних: А — вигляд спереду; Б — вигляд збоку; В — вигляд ззаду; Г — гвинти

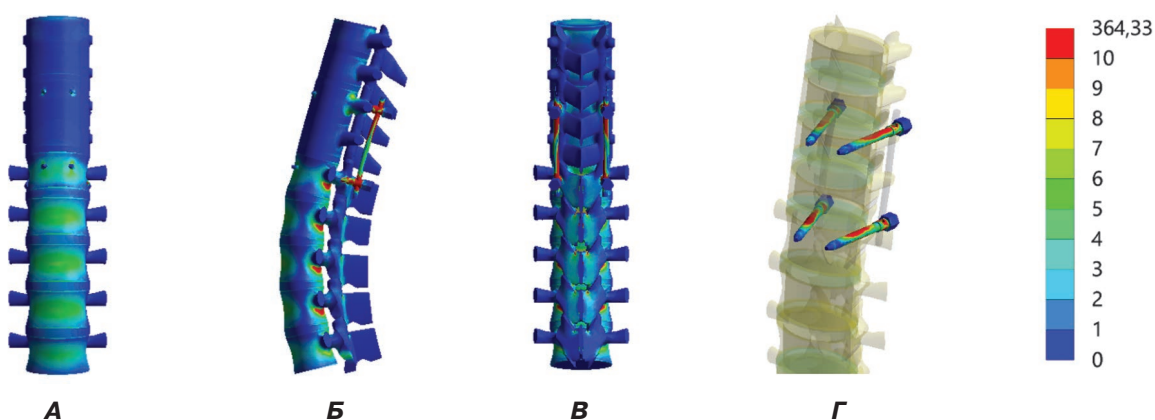


Рисунок 3. Розподіл напруження в моделі груднопоперекового відділу хребта з пошкодженням тіла хребця Th12 типу A1 під дією компресійного навантаження. Транспедикулярна фіксація довгими гвинтами без проміжних: А — вигляд спереду; Б — вигляд збоку; В — вигляд ззаду; Г — гвинти

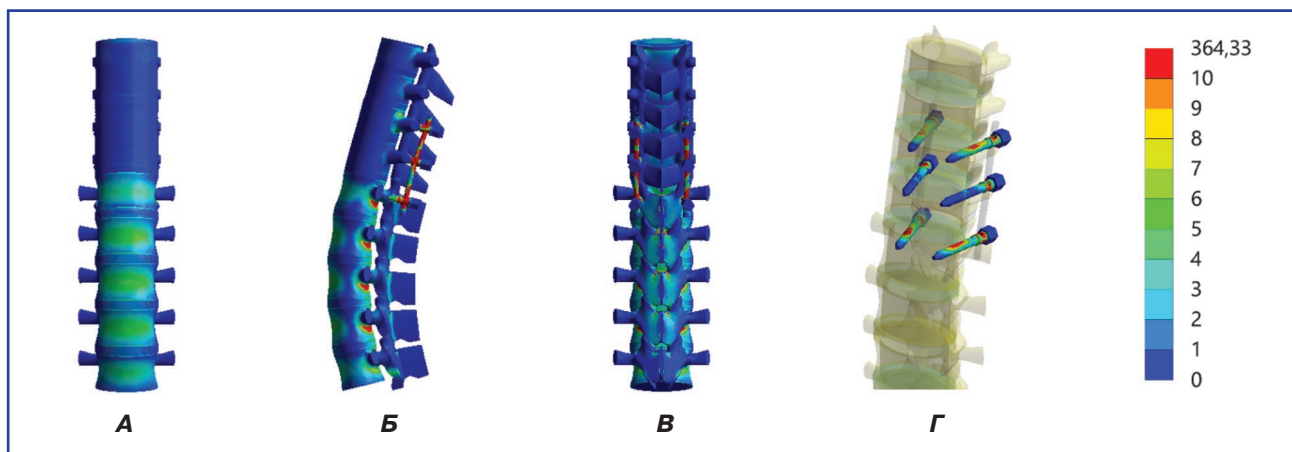


Рисунок 4. Розподіл напруження в моделі груднопоперекового відділу хребта з пошкодженням тіла хребця Th12 типу A1 під дією компресійного навантаження. Транспедикулярна фіксація короткими гвинтами із проміжними в тілі хребця Th12: А — вигляд спереду; Б — вигляд збоку; В — вигляд ззаду; Г — гвинти

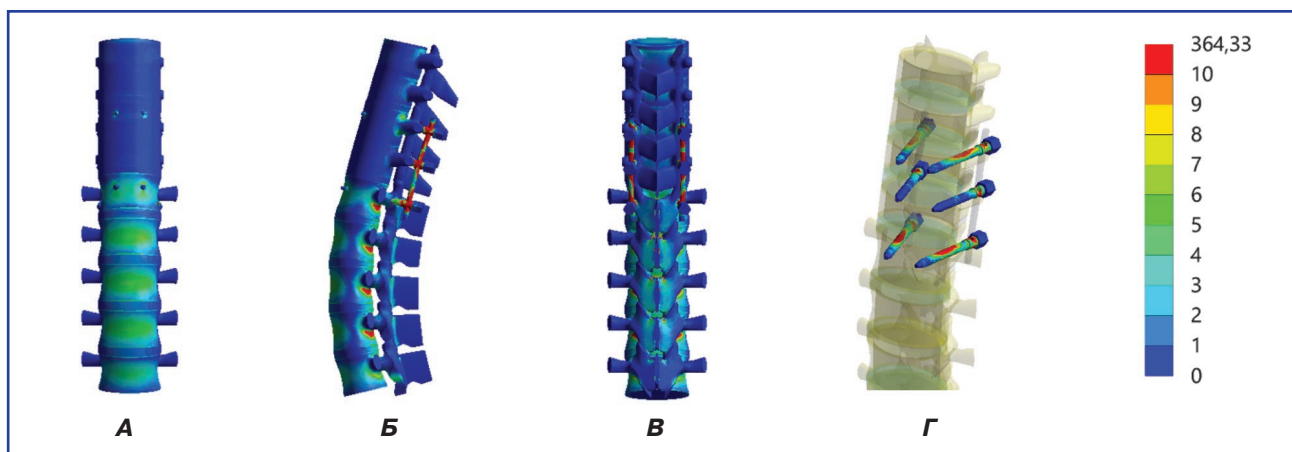


Рисунок 5. Розподіл напруження в моделі груднопоперекового відділу хребта з пошкодженням тіла хребця Th12 типу A1 під дією компресійного навантаження. Транспедикулярна фіксація бікортикальними гвинтами з проміжними в тілі хребця Th12: А — вигляд спереду; Б — вигляд збоку; В — вигляд ззаду; Г — гвинти

Усі матеріали в моделі розглядали як ізотропні й однорідні. Механічні характеристики біологічних тканин (кортикальна кістка, губчаста кістка, суглобовий хрящ і міжхребцеві диски) отримано з літературних джерел [19–21]. Модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона для кортикальної кістки становили 10 000 МПа і 0,30 відповідно, для губчастої кістки — 450 МПа та 0,20, для хряща суглобових поверхонь — 10,5 МПа і 0,49, для міжхребцевого диска — 4,2 МПа та 0,45.

Елементи металоконструкції (гвинти та опорні стрижні) моделювали з титанового сплаву BT-16, який є аналогом Ti-6Al-4V. Механічні характеристики титанового сплаву: модуль Юнга — 110 000 МПа, коефіцієнт Пуассона — 0,30 [22, 23].

Граничні умови та навантаження моделі відповідали фізіологічним умовам положення тіла людини стоячи. Нижня межа моделі, що відповідає дистальній поверхні диска L5–S1, була жорстко зафіксована як нерухома

опора. На модель прикладалося вертикальне осьове стискальне навантаження у вигляді розподіленого тиску величиною 350 Н, що відповідає вазі верхньої частини тулуба [24, 25].

Навантаження прикладалося до верхньої поверхні тіла хребця Th9 і площин його міжхребцевих суглобів. Схеми закріплення та навантаження моделі відповідають таким у попередніх дослідженнях у цьому напрямі.

Аналіз напружено-деформованого стану здійснювали за допомогою програмного комплексу SolidWorks Simulation (CosmosM) виробництва Dassault Systemes (Франція) із використанням алгоритмів скінченно-елементного розрахунку. Як критерій оцінки інтенсивності напруження в матеріалах застосовували напруження за Мізесом, що є еквівалентними напруженнями.

Для порівняння результатів у різних зонах моделі визначали величину напруження в контрольних точках,

розташованих у біомеханічно важливих структурах: тіла хребців Th9, Th10, Th11, Th12, L1–L5, замикальні пластинки суміжних із переломом хребців (нижня пластинка хребця Th11 і верхня пластинка хребця L1), місця входу гвинтів у дужки хребців Th11, Th12, L1, середня частина гвинтів, установлених у тіла цих хребців, опорні балки конструкції. Порівнювали значення еквівалентного напруження в моделях для оцінки впливу довжини гвинтів і наявності проміжних гвинтів на розподіл навантаження.

Результати

Перша модель, що є базовим варіантом із короткими гвинтами без проміжних елементів, при стискальному осьовому навантаженні демонструвала основну деформацію в поперековому відділі моделі, про що свідчило підвищене напруження в тілах поперекових хребців (рис. 2). Максимальний рівень еквівалентного напруження зареєстровано в тілі хребця L1 (близько 18,0 МПа), дещо менше напруження — в тілах хребців L4 (близько 17,0 МПа), L3 (близько 16,2 МПа) і L2 (близько 15,8 МПа). У тілі хребця L5 напруження не перевищувало 10,4 МПа.

У грудному відділі рівень напруження був значно меншим: у тілі хребця Th11 — близько 8,9 МПа, у тілі пошкодженого хребця Th12 — близько 2,4 МПа. Навколо основних фіксувальних гвинтів зареєстровано помірне підвищення напруження в кістковій тканині дужок — близько 7,5 МПа в місцях входу гвинтів у дужки хребців Th11 і L1.

У самих гвинтах рівень еквівалентного напруження був значно вищим, ніж у кістковій тканині: максимальне напруження (близько 44,1 МПа) виникало в гвинтах, зафіксованих у хребці Th11 (верхньому щодо перелому), тоді як у гвинтах, установлених у хребці L1, напруження було вдвічі меншим (близько 27,2 МПа). Найбільш навантаженими елементами конструкції виявилися опорні балки (близько 125,8 МПа).

Розподіл напруження у моделі свідчив про те, що при короткій фіксації без проміжних гвинтів основне навантаження припадало на конструкцію (балки та гвинти), тоді як пошкоджений хребець Th12 був фактично розвантажений і відчував мінімальне напруження.

Друга модель із застосуванням довгих гвинтів без проміжних елементів показала, що використання довгих бікорткальних гвинтів у хребцях Th11 та L1 не призводить до принципових змін характеру напружено-деформованого стану моделі (рис. 3). Загальний розподіл зон підвищеного напруження був подібним до такого в першій моделі з незначними кількісними відмінностями.

У грудному відділі напруження в тілі хребця Th11 становило 8,4 МПа, у пошкодженому хребці Th12 — 2,1 МПа. У поперекових хребцях відмінності були мінімальними: напруження в тілі хребця L1 було дещо меншим (17,7 МПа), у розташованих нижче хребцях L3 і L4 — дещо підвищувалося (16,3 та 17,4 МПа відповідно). Навколо точок входу гвинтів зміни також були незначними: у дужках хребця Th11 напруження дещо

зменшувалося (7,2 МПа), у дужках хребця L1 — зросло (8,1 МПа). Більше змінювався рівень напруження у гвинтах. Так, у гвинтах, установлених у хребець Th11, максимальне напруження становило 47,7 МПа, у гвинтах, установлених у хребець L1, — 41,8 МПа, що значно перевищує показник у першій моделі (27,2 МПа).

Таким чином, бікорткальна фіксація дещо розвантажує кісткові структури (переломаний і суміжні хребці) за рахунок кращої фіксації гвинтів, але перерозподіл навантаження призводить до зростання напруження в гвинтах, особливо в нижньому сегменті L1. Напруження в сполучних балках при довгих гвинтах дещо зменшувалося (124,8 МПа), що вказує на деяке підвищення жорсткості конструкції в цілому.

Третя модель показала, що залучення пошкодженого хребця Th12 у конструкцію за допомогою двох додаткових гвинтів при збереженні коротких гвинтів у хребцях Th11 та L1 призводить до змін напружено-деформованого стану переважно в зонах, безпосередньо пов'язаних з імплантатами (рис. 4).

Порівняно з моделлю без проміжних гвинтів напруження в суміжних із переломом хребцях було дещо меншим: у тілі хребця Th11 — 8,0 МПа (на 10 % менше), у пошкодженому тілі хребця Th12 — 2,1 МПа (у першій моделі — 2,4 МПа). У нижніх поперекових хребцях зареєстровано дуже незначні зміни: у тілі хребця L1 — 18,4 МПа (на 2 % більше порівняно з першою моделлю), у тілі хребця L4 — 17,2 МПа (на 1 % більше), у тілі хребців L2, L3 і L5 — також на 1–2 % (15,6, 15,9 та 10,3 МПа відповідно).

Таким чином, використання проміжних гвинтів дещо розвантажує переломаний хребець і розташований вище хребець, перерозподіляючи частину навантаження вниз конструкцією. Це підтверджується аналізом напруження навколо гвинтів: у дужках хребця Th12 навколо введених проміжних гвинтів виникало напруження близько 1,5 МПа, що свідчило про залучення цього рівня в передачу навантаження. У результаті напруження навколо основних гвинтів знижувалося: у дужках хребця Th11 — із 7,5 до 5,1 МПа, у дужках хребця L1 — із 7,5 до 7,4 МПа. В основних гвинтах також зафіксовано тенденцію до зменшення навантаження: максимальне напруження у гвинтах, установлених у хребець Th11, — до 39,5 МПа порівняно з 44,1 МПа в першій моделі, у гвинтах, установлених у хребець L1, — до 28,3 МПа порівняно з 27,2 МПа (рівень похибки моделювання).

У додаткових гвинтах у тілі хребця Th12 еквівалентне напруження становило близько 7,2 МПа, що свідчить про участь цих гвинтів у передачі частини навантаження крізь зруйнований хребець. Цікаво, що використання проміжних гвинтів спричинило значне зростання напруження у стрижнях конструкції (260,2 МПа, що вдвічі перевищує аналогічний показник у моделі без проміжних гвинтів).

Таким чином, додаткова фіксація переломаного хребця дає змогу зняти частину навантаження з основних гвинтів і навіть трохи розвантажує суміжні хребці, але зекономлені навантаження переважно бере на себе

опорна балка конструкції, яка працює в напруженішому режимі.

Четверта модель із застосуванням довгих гвинтів і проміжних гвинтів у тілі хребця Th12 показала, що комбінація бікортікальних довгих гвинтів із додатковою фіксацією травмованого хребця дає змогу досягти найменшого рівня напруження в більшості елементів моделі (рис. 5). Напружено-деформований стан моделі характеризувався зниженням еквівалентних напружень практично в усіх контрольних точках порівняно з попередніми варіантами.

У тілі хребця Th11 напруження зменшилося до близько 7,4 МПа, що є найнижчим значенням серед усіх моделей. У тілі хребця Th12 величина напруження (близько 2,1 МПа) не відрізнялася від показника в третій моделі. У тілі хребця L1 напруження становило 17,9 МПа, що дещо нижче, ніж у третій моделі (18,4 МПа), та мало перевищувало показник у другій моделі (17,7 МПа). У тілах хребців L2–L5 показники напруження були порівнянними з такими в третій моделі з відхиленнями 0,1–0,2 МПа.

Навколо точок входу гвинтів зареєстровано найменший рівень напруження серед усіх варіантів: у дужках хребця Th11 — 4,9 МПа, у дужках хребця Th12 — 1,5 МПа, як і в третій моделі, в дужках хребця L1 — 8,0 МПа. Рівень напруження у гвинтах, уста-

новлених у хребець Th11, становив 43,5 МПа, що дещо перевищувало показник у третій моделі, але було менше за показник у другій моделі (47,7 МПа). У гвинтах, установлених у хребець L1, напруження становило 44,0 МПа, що було максимальним значенням серед усіх варіантів для L1, зокрема перевищувало показник у другій моделі (41,8 МПа). У гвинтах, установлених у хребець Th12, напруження становило 7,2 МПа, як і в третій моделі.

Таким чином, хоча додавання проміжних гвинтів у комбінації з довгими гвинтами дало змогу знизити навантаження на більшість кісткових елементів і точок входу гвинтів, навантаження на гвинти в хребці L1 залишилося високим. Як і в третій моделі, відбулося різке збільшення напруження в стрижнях до 258,3 МПа, що вдвічі вище за базовий рівень. Отже, конструкція з довгими гвинтами та проміжною фіксацією забезпечує найбільшу жорсткість, але при цьому значно зростає напруження в металевих стрижнях.

Аналіз показників у контрольних точках усіх моделей (табл. 1) показав, що відмінності між моделями за напруженням у кісткових елементах мінімальні, тоді як на елементи металоконструкції істотно впливає спосіб фіксації. Використання довгих бікортікальних гвинтів та особливо додаткових гвинтів у пошкодженному хребці змінює розподіл навантаження між гвинтами й

Таблиця 1. Напруження під дією компресійного навантаження у моделях груднопоперекового відділу хребта з пошкодженням тіла хребця Th12 типу A1 за різних варіантів короткої транспедикулярної фіксації

Контрольні точки	Напруження, МПа			
	Модель без проміжних гвинтів		Модель із проміжними гвинтами	
Зона	Короткі гвинти	Довгі гвинти	Короткі гвинти	Довгі гвинти
Тіло хребця Th9	4,1	4,1	4,1	4,1
Тіло хребця Th10	3,0	2,9	3,0	3,0
Тіло хребця Th11	8,9	8,4	8,0	7,4
Тіло хребця Th12	2,4	2,1	2,1	2,1
Тіло хребця L1	18,0	17,7	18,4	17,9
Тіло хребця L2	15,8	15,8	15,6	15,6
Тіло хребця L3	16,2	16,3	15,9	15,9
Тіло хребця L4	17,0	17,4	17,2	17,2
Тіло хребця L5	10,4	10,4	10,3	10,3
Нижня замикальна пластинка хребця Th11	2,0	1,9	2,1	2,0
Верхня замикальна пластинка хребця L1	6,1	5,8	5,6	5,4
Вхід гвинтів у дугу хребця Th11	7,5	7,2	5,1	4,9
Вхід гвинтів у дугу хребця Th12	–	–	1,5	1,5
Вхід гвинтів у дугу хребця L1	7,5	8,1	7,4	8,0
Гвинти в тілі хребця Th11	44,1	47,7	39,5	43,5
Гвинти в тілі хребця Th12	–	–	7,2	7,2
Гвинти в тілі хребця L1	27,2	41,8	28,3	44,0
Опорні балки	125,8	124,8	260,2	258,3

стрижнями. Додаткова фіксація хребця Th12 зменшує навантаження на основні гвинти, частково переносить його на зазначений хребець і значною мірою — на стрижні, що працюють на вигин.

Обговорення

Результати моделювання засвідчили, що всі розглянуті варіанти короткого транспедикулярного остеосинтезу забезпечують порівнянний розподіл навантаження в зоні перелому типу A1. Незважаючи на структурні відмінності конструкцій, напруження в тілах хребців практично не відрізнялися за різних способів фіксації. Це означає, що для розвантаження пошкодженого хребця та профілактики його вторинної компресії будь-який із досліджених варіантів є ефективним.

Тип перелому A1, що є стабільним клиноподібним компресійним переломом, не супроводжується пошкодженням задніх структур, тому навіть мінімальна конструкція з чотирьох гвинтів забезпечує необхідну стабільність сегмента. Цей висновок узгоджується з клінічними даними про те, що для відносно простих компресійних переломів короткий спондилодез дає задовільні результати без обов'язкового залучення травмованого хребця [26]. Однак для більш високоенергетичних пошкоджень, наприклад вибухових переломів типу A3/A4, додавання проміжних гвинтів або подовження фіксації суттєво поліпшує прогноз, знижуючи ризик інструментальної неспроможності та післяопераційної втрати корекції. За даними метааналізу, при спондилодезі шістьма гвинтами із залученням компресованого хребця втрата висоти хребця та кіфозу в післяопераційний період є меншою, а поломка гвинтів, що сприяють зменшенню больового синдрому в пацієнтів, є рідшою [27, 28].

Таким чином, доцільність застосування проміжних гвинтів залежить від тяжкості пошкодження: при простих компресійних переломах типу A1 ефект стабільності мінімальний, тоді як при нестабільних вибухових переломах додаткові точки фіксації істотно підвищують надійність конструкції.

Справжнє моделювання показало, що проміжні гвинти в пошкодженому хребці перерозподіляють навантаження: частина сили, яка раніше припадала на основні гвинти та прилеглі хребці, перерозподіляється на додаткові гвинти й компресований хребець, але значно зростає навантаження на опорні балки. Конструкція стає жорсткішою, менше деформується в зоні перелому, що запобігає повторній компресії пошкодженого тіла хребця.

Відомо, що в клінічній практиці короткі чотиригвинтові конструкції нерідко зазнають поломки саме внаслідок перевантаження крайніх гвинтів або вигину стрижнів у зоні перелому. Додавання гвинтів посередині дає змогу зміцнити конструкцію та знизити навантаження на гвинти.

Отримані результати узгоджуються з даними, отриманими в інших біомеханічних дослідженнях: шестигвинтові конструкції мають більшу жорсткість і знижують рівень напруження у гвинтах порівняно з

чотиригвинтовими системами [29]. Деякі дослідники за допомогою моделювання показали, що додаткові гвинти в комбінації з цементним зміцненням тіла хребця зменшують еквівалентне напруження як у гвинтах, так і в стрижнях конструкції [30].

Інші автори відзначили тенденцію до збільшення напруження саме в опорних балках при використанні проміжних гвинтів, тоді як напруження в основних гвинтах знижувалося [5]. Отримані дані підтверджують такий перерозподіл: зменшення напруження в гвинтах, особливо у верхньому хребці (Th11), та зростання напруження в стрижнях. Таким чином, хоча проміжні гвинти розвантажують критичні точки (контакт «гвинт — кістка», де часто починається розхитування), слід враховувати зростання навантаження в металевому каркасі.

Щодо довжини гвинтів отримані результати свідчать про відносно незначний вплив цього чинника на напружено-деформований стан при осьовому навантаженні. Бікортикальні гвинти, що є довгими і проходять крізь передню кортикальну пластинку, дещо рівномірніше передають навантаження на тіло хребця, що проявлялося незначним зниженням напруження в кістковій тканині навколо точки входу гвинтів і в тілі хребця вище за перелом.

Подібні висновки отримані і в інших роботах. Зокрема, показано, що повне занурення гвинта до протилежної кортикальної стінки збільшує міцність системи «гвинт — тіло хребця» щодо екстракції та зменшує мікрODEFORMАЦІЮ конструкції [9, 10]. У цій моделі бікортикальні гвинти продемонстрували зниження напруження в тілах переломаного та суміжних хребців на 2–3 %, що можна вважати несуттєвим. Водночас напруження в гвинтах зросло помітно — до 50 % у нижньому гвинті (L1).

Можливо, довші гвинти сприймають більший згинальний момент, особливо коли відсутня підтримка проміжних елементів (друга модель). Загалом різниця між монокортикальними й бікортикальними гвинтами з погляду клінічної ефективності навряд чи є значущою, оскільки обидва типи забезпечують стабілізацію перелому типу A1. Вибір довжини гвинтів може визначатися анатомічними особливостями та досвідом хірурга.

Клінічне значення одержаних результатів полягає в обґрунтуванні вибору менш інвазивної тактики при лікуванні відносно простих компресійних переломів груднопоперекового відділу. Дослідження підтверджує, що для переломів типу A1 коротка транспедикулярна фіксація двома суміжними хребцями без проміжних гвинтів забезпечує достатню стабільність і мінімальне навантаження на пошкоджений хребець.

Додавання гвинтів у пошкоджене тіло хребця Th12 лише незначно змінює розподіл напруження в хребцях, тому за відсутності інших показань (нестабільність або значне руйнування тіла хребця) можна уникнути зайвої травматизації, обмежившись чотирма гвинтами. Це спрощує оперативне втручання, зменшує його травматичність і тривалість, що актуально в пацієнтів

із легкими ушкодженнями та без загрози неврологічних ускладнень. Однак слід урахувати, що в цьому дослідженні моделювали лише компресійне навантаження, при інших патернах навантаження (згинання, розгинання, ротація) результати можуть суттєво відрізнятися. Остаточні висновки можливі лише після повного комплексу біомеханічних експериментів.

Перспективи подальших досліджень

У наступних роботах планується більш детальне вивчення напружено-деформованого стану моделей за різних типів навантаження. На основі комплексного аналізу з урахуванням клінічної значущості буде визначено оптимальну стратегію стабілізації, яку можна застосовувати при плануванні хірургічного втручання.

Висновки

Порівняльний біомеханічний аналіз варіантів короткого транспедикулярного спондилодезу при переломі типу A1 грудопоперекового переходу показав відсутність принципових відмінностей у розподілі напруження в елементах моделей між конструкціями з довгими або короткими гвинтами, а також за наявності або відсутності проміжних гвинтів. Усі досліджені конфігурації фіксації забезпечують надійну стабілізацію переломаного хребця та ефективно розвантажують його передній відділ.

З урахуванням мінімальних біомеханічних відмінностей при виборі методу фіксації переломів типу A1 слід керуватися іншими критеріями, переважно прагненням до меншої інвазивності та зменшення операційних ризиків для пацієнта. Отримані результати підтверджують достатність короткої чотиригвинтової фіксації для компресійних переломів грудопоперекового переходу та обґрунтовують консервативніший підхід до вибору хірургічної тактики при зазначеному типі пошкодження.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Внесок авторів. Нехлопочин О.С. — концепція та дизайн роботи, збір та аналіз даних, написання статті, остаточне затвердження статті; Вербов В.В., Чешук Є.В. — збір та аналіз даних, критичний огляд; Карпінський М.Ю. — концепція та дизайн роботи, відповідальність за статистичний аналіз, написання статті, остаточне затвердження статті; Яресько О.В. — збір та аналіз даних, відповідальність за статистичний аналіз.

Список літератури

1. Du Plessis A, Van Schoor A, Wessels Q, Murphy P, Van Schouwenburg F, Ihuhua P, et al. Vertebrae at the thoracolumbar junction: A quantitative assessment using CT scans. *Journal of anatomy*. 2022;240(6):1179-1186. doi: 10.1111/joa.13619. PMID: 34958488.
2. Liebsch C, Wilke HJ. How Does the Rib Cage Affect the Biomechanical Properties of the Thoracic Spine? A Systematic

Literature Review. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:904539. doi: 10.3389/fbioe.2022.904539. PMID: 35782518.

3. Orbach MR, Mahoney J, Bucklen BS, Balasubramanian S. In vitro coupled motions of the whole human thoracic and lumbar spine with rib cage. *JOR Spine*. 2023;6(3):e1257. doi: 10.1002/jsp2.1257. PMID: 37780824.

4. Alimohammadi E, Bagheri SR, Joseph B, Sharifi H, Shokri B, Khodadadi L. Analysis of factors associated with the failure of treatment in thoracolumbar burst fractures treated with short-segment posterior spinal fixation. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2023;18(1):690. doi: 10.1186/s13018-023-04190-w.

5. Xu C, Bai X, Ruan D, Zhang C. Comparative finite element analysis of posterior short segment fixation constructs with or without intermediate screws in the fractured vertebrae for the treatment of type a thoracolumbar fracture. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2024;27(11):1398-1409. doi: 10.1080/10255842.2023.2243360. PMID: 37553841.

6. Li K, Zhang W, Liu D, Xu H, Geng W, et al. Pedicle screw fixation combined with intermediate screw at the fracture level for treatment of thoracolumbar fractures: A meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2016;95(33):e4574. doi: 10.1097/md.0000000000004574. PMID: 27537586.

7. Liu H, Wang H, Liu J, Li C, Zhou Y, Xiang L. Biomechanical comparison of posterior intermediate screw fixation techniques with hybrid monoaxial and polyaxial pedicle screws in the treatment of thoracolumbar burst fracture: a finite element study. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2019;14(1):122. doi: 10.1186/s13018-019-1149-2. PMID: 31068193.

8. Kapoen C, Liu Y, Bloemers FW, Deunk J. Pedicle screw fixation of thoracolumbar fractures: conventional short segment versus short segment with intermediate screws at the fracture level — a systematic review and meta-analysis. *European Spine Journal*. 2020;29:2491-2504. doi: 10.1007/s00586-020-06479-4. PMID: 32529525.

9. Bezer M, Ketenci IE, Saygi B, Kiyak G. Bicortical versus unicortical pedicle screws in direct vertebral rotation: an in vitro experimental study. *J Spinal Disord Tech*. 2012;25(6):E178-182. doi: 10.1097/BSD.0b013e31825dd542. PMID: 22614270.

10. Shibasaki Y, Tsutsui S, Yamamoto E, Murakami K, Yoshida M, Yamada H. A bicortical pedicle screw in the caudad trajectory is the best option for the fixation of an osteoporotic vertebra: An in-vitro experimental study using synthetic lumbar osteoporotic bone models. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2020;72:150-154. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2019.12.013. PMID: 31877533.

11. Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2013;38(23):2028-2037. doi: 10.1097/BRS.0b013e3182a8a381. PMID: 23970107.

12. Kepler CK, Vaccaro AR, Schroeder GD, Koerner JD, Vialle LR, Aarabi B, et al. The Thoracolumbar AOSpine Injury Score. *Global Spine J*. 2016;6(4):329-334. doi: 10.1055/s-0035-1563610. PMID: 27190734.

13. Peev N, Zileli M, Sharif S, Arif S, Brady Z. Indications for Nonsurgical Treatment of Thoracolumbar Spine Fractures: WFNS Spine Committee Recommendations. *Neurospine*. 2021;18(4):713-724. doi: 10.14245/ns.2142390.195.

14. Pettit JC, Desai A, Kashkoush A, Ahorukomeye P, Potter TO, Stout A, et al. Failure of Conservatively Managed Traumatic Vertebral Compression Fractures: A Systematic Review. *World Neurosurg.* 2022;165:81-88. doi: 10.1016/j.wneu.2022.06.053. PMID: 35724881.
15. Yaman O, Zileli M, Şentürk S, Paksoy K, Sharif S. Kyphosis After Thoracolumbar Spine Fractures: WFNS Spine Committee Recommendations. *Neurospine.* 2021;18(4):681-692. doi: 10.14245/ns.2142340.170. PMID: 35000321.
16. Tan T, Huang MS, Rutges J, Marion TE, Fitzgerald M, Hunn MK, et al. Rate and Predictors of Failure in the Conservative Management of Stable Thoracolumbar Burst Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Global Spine J.* 2022;12(6):1254-1266. doi: 10.1177/21925682211031207. PMID: 34275348.
17. Nekhlopochyn OS, Verbov VV, Cheshuk IV, Karpinsky MY, Yaresko OV, Korolkov IO. Finite element modeling and optimization of biomechanical parameters of short stabilization of burst fractures of the thoracolumbar junction under compression loading. *Trauma.* 2025;26(1):55-63. doi: 10.22141/1608-1706.1.26.2025.998.
18. Nekhlopochyn OS, Verbov VV, Cheshuk IV, Vorodi MV, Karpinsky MY, Yaresko OV. Impact of transpedicular fixation on thoracolumbar junction burst fracture stability: a biomechanical perspective. *Ukrainian Neurosurgical Journal.* 2024;30(3):30-37. doi: 10.25305/unj.303393.
19. Boccaccio A, Pappalettere C. Mechanobiology of Fracture Healing: Basic Principles and Applications in Orthodontics and Orthopaedics. In: Klika V, editor. *Theoretical Biomechanics.* Croatia: InTech; 2011. P. 21-48.
20. Nekhlopochin A, Nekhlopochin S, Karpinsky M, Shvets A, Karpinskaya E, Yaresko A. Mathematical Analysis and Optimization of Design Characteristics of Stabilizing Vertebral Body Replacing Systems for Subaxial Cervical Fusion Using the Finite Element Method. *Hirurgiâ pozvonočnika.* 2017;14(1):37-45. doi: 10.14531/ss2017.1.37-45.
21. Nekhlopochyn OS, Verbov VV, Karpinsky MY, Yaresko OV. Biomechanical evaluation of the pedicle screw insertion depth and role of cross-link in thoracolumbar junction fracture surgery: a finite element study under compressive loads. *Ukrainian Neurosurgical Journal.* 2021;27(3):25-32. doi: 10.25305/unj.230621.
22. Cao F, Zhang T, Ryder MA, Lados DA. A Review of the Fatigue Properties of Additively Manufactured Ti-6Al-4V. *JOM.* 2018;70(3):349-357. doi: 10.1007/s11837-017-2728-5.
23. Niinomi M. Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2008;1(1):30-42. doi: 10.1016/j.jmbbm.2007.07.001. PMID: 19627769.
24. Popsuyshapka KO, Teslenko SO, Popov AI, Karpinsky MY, Yaresko OV. Study of the stress-strain state of the spine model for various methods of treatment for fractures of the bodies of the thoracic spine. *Trauma.* 2022;23(5):53-64. doi: 10.22141/1608-1706.5.23.2022.916.
25. Radchenko V, Popsuyshapka K, Yaresko O. Investigation of stress-strain state in spinal model for various methods of surgical treatment of thoracolumbar burst fractures (Part one). *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics.* 2017;1:27-33. doi: 10.15674/0030-59872017127-33.
26. Wang J, Yang H, Ganau M, Wang Y, Miao J, Yan L, et al. A comparative analysis of three distinct approaches for the management of type A1 traumatic thoracolumbar fractures: a retrospective cohort study with a minimum 6-year follow-up. *Journal of orthopaedic surgery and research.* 2025;20(1):856. doi: 10.1186/s13018-025-06262-5. PMID: 41013774.
27. Wang H, Zhao Y, Mo Z, Han J, Chen Y, Yu H, et al. Comparison of short-segment monoaxial and polyaxial pedicle screw fixation combined with intermediate screws in traumatic thoracolumbar fractures: a finite element study and clinical radiographic review. *Clinics (Sao Paulo, Brazil).* 2017;72(10):609-617. doi: 10.6061/clinics/2017(10)04. PMID: 29160423.
28. Vilela A, Couto B, Ferreira D, Cruz A, Azevedo J, Pereira J, et al. Risk factors for failure in short segment pedicle instrumentation in thoracolumbar fractures. *Brain Spine.* 2025;5:104266. doi: 10.1016/j.bas.2025.104266. PMID: 40417011.
29. Farrokhi MR, Razmkon A, Maghami Z, Nikoo Z. Inclusion of the fracture level in short segment fixation of thoracolumbar fractures. *Eur Spine J.* 2010;19(10):1651-1656. doi: 10.1007/s00586-010-1449-z. PMID: 20495932.
30. Zhang GA, Zhang WP, Chen YC, Hou Y, Qu W, Ding LX. Efficacy of Vertebroplasty in Short-Segment Pedicle Screw Fixation of Thoracolumbar Fractures: A Meta-Analysis. *Med Sci Monit.* 2019;25:9483-9489. doi: 10.12659/msm.917253. PMID: 31829312.

Отримано/Received 04.09.2025

Рецензовано/Revised 17.09.2025

Прийнято до друку/Accepted 08.10.2025

Information about authors

Oleksii S. Nekhlopochyn, PhD in Medicine, Neurosurgeon, Senior Research Fellow, Department of Spinal Pathology, Romodanov Neurosurgery Institute of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: AlexeyNS@gmail.com; phone: +380 (95) 033-04-48; <https://orcid.org/0000-0002-1180-6881>

Vadym V. Verbov, PhD in Medicine, Neurosurgeon, Department of Restorative Neurosurgery, Romodanov Neurosurgery Institute of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: v.verbov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3074-9915>

Yevhen V. Cheshuk, PhD in Medicine, Neurosurgeon, Department of Restorative Neurosurgery, Romodanov Neurosurgery Institute of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: evcheshuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0063-2141>

Mykhailo Yu. Karpinsky, Senior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; phone: +380 (67) 571-48-63; <https://orcid.org/0000-0002-3004-2610>

Oleksandr V. Yaresko, Junior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: avyresko@gmail.com; phone: +380 (57) 725-14-74; <https://orcid.org/0000-0002-2037-5964>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. O.S. Nekhlopochyn — work concept and design, data collection and analysis, writing the article, final approval of the article; V.V. Verbov, Ye.V. Cheshuk — data collection and analysis, critical review; M.Yu. Karpinsky — work concept and design, responsibility for statistical analysis, writing the article, final approval of the article; O.V. Yaresko — data collection and analysis, responsibility for statistical analysis.

O.S. Nekhlopochny¹, V.V. Verbov¹, Ye. V. Cheshuk¹, M.Yu. Karpinsky², O.V. Yaresko²

¹Romodanov Neurosurgery Institute of NAMSU, Kyiv, Ukraine

²Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine

Stress-strain state of a thoracolumbar spine model with a Th12 type A1 vertebral fracture under short-segment pedicle fixation: analysis of compressive loading

Abstract. Background. Fractures of the thoracolumbar junction (Th11-L2) are among the most common spinal injuries and frequently lead to post-traumatic deformities and neurological complications. The most widespread surgical treatment is short-segment pedicle fixation; however, questions remain regarding the necessity of including the fractured vertebra in the construct and the optimal screw length. **Objective:** to evaluate the stress-strain state of the thoracolumbar spine with a Th12 vertebral body fracture of type A1 according to the AO Spine classification, and to determine the influence of the main pedicle screw length and the presence of intermediate screws in the fractured vertebra during short-segment fixation. **Materials and methods.** A three-dimensional finite element model of the thoracolumbar spine (Th9-L5) was constructed based on computed tomography data. A type A1 Th12 vertebral body fracture (AO Spine classification) was simulated. Four short-segment pedicle fixation configurations were analyzed: short screws without intermediate screws; long screws without intermediate screws; short screws with intermediate screws in the Th12 vertebral body; long screws with intermediate screws in the Th12 vertebral body. An axial compressive load of 350 N was applied. Stress

distribution was analyzed using the finite element method according to the von Mises criterion. **Results.** The distribution of stresses in the vertebral bodies showed only minor variations (2–3 %) across the models. The basic four-screw construct provided sufficient unloading of the fractured vertebra. Adding intermediate screws reduced stress in the main screws, particularly at Th11, but doubled stress levels in the supporting rods. The use of long bicortical screws exerted a moderate unloading effect on the bony structures but increased stress within the screws themselves, especially at L1. **Conclusions.** In cases of type A1 compression fractures requiring surgical management, short-segment four-screw fixation ensures adequate spinal stability while minimizing the mechanical load on the fractured vertebra. The use of long screws and additional intermediate screws is more appropriate for severe injuries, whereas in simple compression fractures such modifications do not offer significant biomechanical advantages but increase surgical invasiveness.

Keywords: thoracolumbar junction; Th12 fracture; compression fracture; pedicle fixation; intermediate screws; bicortical screws; finite element modeling

Rabab Abbas Hasan

College of Medicine, University of Thi-Qar, Ministry of Health, Thi-Qar, Iraq

Incidence of hypertrophic scar in burn patients

Abstract. Background. Hypertrophic scarring represents an aberrant response to burn injuries and is the result of excess collagen deposition, persistent inflammatory mediators, and excessive proliferation of fibroblasts. They form distinctive, raised, thickened, and erythematous tissue that remains within the borders of the original wound but can lead to considerable aesthetic and functional morbidities. If wound healing is delayed or poorly managed, hypertrophic scars may persist for months or even years unlike keloid scars, which may never regress over time. **Objective:** to assess the incidence and functional characteristics of hypertrophic scars in burn patients. **Materials and methods.** This is a cross-sectional study that was performed at Al-Nasiriya Teaching Hospital in Thi-Qar Province during the period from November 1, 2024, to February 1, 2025. Twenty participants were randomly selected. Structured interviews and a questionnaire-based form were used for data collection, including demographics and evaluation of burn injuries (burn cause, severity, location, signs and symptoms, hypertrophic scar formation, and treatment interventions). Ethical considerations protected the anonymity and confidentiality of participants. **Results.** A total of 20 subjects were included in the study, with 10 people per age range (15–30 and 31–50 years). 60 % of the sample was male, and 55 % of participants were from rural regions. The most frequent injury was a thermal burn (70 %), followed by oil (20 %) and chemical burns (10 %). Second-degree burns were the most common (70 %), and 35 % of the subjects experienced loss of sensation. The most common site for scars was the lower limb (30 %). The most frequent clinical presentation was itching (70 %), followed by pain and limitation in movement (20 %). Treatments included steroid injections (35 %) and daily dressing changes (25 %); however, 30 % of patients had not received any prior treatment. No scar prevention measures were applied (100 %). **Conclusions.** The most common category is thermal burns, and the majority are second-degree burns. The most frequent site of scarring is the lower limb and itching developed as the most frequent symptom. **Keywords:** hypertrophic scar; burn; itching; second-degree burns; thermal burn

Introduction

Hypertrophic scarring represents an aberrant response to burn injuries and is the result of excess collagen deposition, persistent inflammatory mediators, and excessive proliferation of fibroblasts. They form distinctive, raised, thickened, and erythematous tissue that remains within the borders of the original wound, but can lead to considerable aesthetic and functional morbidities. If wound healing is delayed or poorly managed, hypertrophic scars may persist for months or even years unlike keloid scars, which may never regress over time [1].

Hypertrophic scars can develop in burn patients with an incidence rate ranging widely based on the severity of the burn, the depth of the damage, and the quality of the wound care received, as well as each patient's genetic predisposition to developing those types of scars [2].

Thickened or hypertrophic scarring is reported to occur in 30–90 % of deep dermal burns, especially those that take longer than three weeks to heal. In this study, the most com-

mon site of hypertrophic scars was the lower limb (30 %), while the left arm, upper trunk, and upper limb were equally predominant (20 % each). The most frequent symptom was itching (70 %), but pain (20 %) and movement limitations (10–20 %) were also common, especially when scars formed across joints [3].

There are multiple factors contributing to hypertrophic scar formation in burn patients. Burn severity and depth are particularly critical, second- and third-degree burns are a significant complication, as they destroy deep skin layers and result in slow, difficult wound healing. With delayed closure of wounds (> 3 weeks), there is increased fibroblast activity and collagen synthesis, resulting in hypertrophic scars [4].

Wound infections, repeated irritation, or improper burn care can cause chronic inflammation, which additionally promotes the proliferation of fibroblasts and thereby contributes to the formation of hypertrophic scars. Genetic predisposition also plays a major role, with those who have a

darker skin tone or family members with a history of hypertrophic scarring being more prone. In highly mobile areas such as the joint (elbow, wrist, knee), neck and shoulders, mechanical tension on the wound site can cause excessive collagen production and scar hypertrophy [5].

Location, size, and duration determine the symptoms of hypertrophic scars. In clinical examination, hypertrophic scars appear as tight, elevated, and erythematous lesions that are confined to the same area of the burn. These scars are typically characterized by persistent erythema, increased vascularization, and thick fibrotic tissue leading to restriction and stiffness over time [6].

Itching (pruritus) and discomfort are common complaints. One of the results of excess collagen deposition and persistent inflammation is the irritation of nerves. There may be pain and tenderness, especially if internal tissues are tested against external pressure or are moved. Hypertrophic scar formation over joints can lead to a restricted range of motion resulting in functional impairment and contractures as seen in 10 % of wrist- and 20 % of elbow-involved scars in this study [7].

Hypertrophic scars are diagnosed mainly by clinical features, including patient history, time to wound healing, and physical examination. This includes assessment of the scar for thickness, texture, color, vascularity, and symptoms (itching, pain, stiffness). Hypertrophic scars usually arise within 4–8 weeks after burn wound closure, whereas keloid scars may occur later and extend beyond the boundaries of the original wound. Scar assessment scales such as the Vancouver Scar Scale can be utilized to objectively assess scar height, pliability, pigmentation, and vascularity [8–11].

Hypertrophic scars are an inevitable consequence of burns, and they can lead to significant morbidity for patients. Their management requires a multimodal approach to scar thickness reduction, functional restoration, and improved cosmetic.

Materials and methods

Study design

A cross-sectional study was conducted to assess the incidence and characteristics of hypertrophic scars in burn patients at Al-Nasiriya Teaching Hospital in Thi-Qar Province, which receives patients from all over the region. The date range of the study periods was from November 1, 2024, to February 1, 2025.

Sampling technique

The study involved 20 subjects who were randomly recruited from the hospital's burn unit. The population included both males and females who were burn victims receiving treatment or follow-up for previous burn injuries.

Data collection

Data were obtained using structured interviews performed by the investigator. A standardized form, comprising two sections in a questionnaire format, was utilized.

The first section collected demographic data such as age, sex, occupation, residence, medical history and medication history. The second section focused on burn injury evaluation, including the cause of burn, burn se-

verity, burn site, and associated symptoms, as well as the presence of hypertrophic scars (if any) and prior treatment interventions.

The assessment comprised details on burn wound healing, scar formation, and complications associated with the healing process, like itching, pain, and movement restrictions.

Ethical approval

No personally identifying or sensitive patient data were collected in conducting this study. Anonymity and confidentiality were ensured throughout the research process.

Statistical analysis

Data were organized and analyzed using Microsoft Excel 2013 and SPSS Statistics v21. Descriptive statistics, in terms of frequency and percentage, were used to summarize variables.

Results

Depending on age, the participants were distributed into two equal classes: half (50 %) were in the 15–30-year range and half (50 %) in the 31–50-year range. As for sex status, 60 % were male while 40 % were female. In terms of occupation, most patients were employees (70 %), while students represented the remaining 30 % of cases. Of the participants, 55 % lived in rural areas and 45 % in urban areas for residency. As far as comorbidities are concerned, 85 % of the subjects did not have any comorbidity, while 15 % had it. As for medical and surgical history, 90 % had no prior medical or surgical history, while 10 % had such a history. The history of drug use indicated that 5 % of the patients had a history of drug abuse. The timing of burn injuries was as follows: 90 % occurred within 7 months to 1 year, and 10 % within 1 to 6 months. Finally, 85 % of the patients developed scars 3 to 6 months post-procedure and 15 % — 7 to 10 months post-procedure (Table 1).

Table 2 shows the burn injury history and characteristics of 20 study participants. Thermal burn was the most common cause of burn injury (70 %), followed by oil (20 %) and chemical burns (10 %). Second-degree burns (70 %) were predominant in severity, while 30 % of patients had third-degree burns. Relatedly, 75 % of participants reported blisters, while 25 % did not develop them. Burns varied in appearance, with 50 % of subjects presenting with burn lines that were pink or red, 25 % having white burns, 20 % reporting black burns, and 5 % having pink burns only. 65 % of participants retained sensation at the burn site, but 35 % showed loss of sensation.

Table 3 demonstrates the history of complications in the study sample of 20 participants, including scar location and associated symptoms. In terms of scar location, the lower limb was the most commonly involved site (30 %), followed by the left arm (20 %), upper trunk (20 %), and upper limb (20 %), with hand scars being the rarest at 10 %. Itching was the most common symptom affecting 70 % of participants. Elbow pain and limited motion of the elbow were present in 20 % of the cases, while limited motion of the wrist was found to be the least common occurring in 10 %.

Table 4 presents the management and prevention practices implemented for a total of 20 participants in this study. The treatment included steroid injection, which was the

most commonly administered modality (35 %), followed by daily dressing changes (25 %). Interestingly, 30 % of the patients had not received treatment for the disease before, and 10 % of the cases were treated using the excision graft approach. From the perspective of scar prevention, the data show that 100 % of patients did not use specific preventive measures.

Discussion

This study examined the incidence of hypertrophic scars among burn patients taking into account demographics, burn degree, complications, infection types, and management.

50 % of the participants were in the age group of 15–30 years and the other half were between 31 and 50 years. Also, 60 % of patients were male, and 40 % were female,

Table 1. Distribution of the study sample by demographic data

Variable	Ranking and intervals	Frequency	Percentage
Age group	15–30	10	50.0
	31–50	10	50.0
Gender	Female	8	40.0
	Male	12	60.0
Occupation	Employee	14	70.0
	Student	6	30.0
Residency	Rural	11	55.0
	Urban	9	45.0
Comorbidities	Don't have	17	85.0
	Have	3	15.0
Medical history	Don't have	18	90.0
	Have	2	10.0
Surgical history	Don't have	18	90.0
	Have	2	10.0
Drug history	Don't have	19	95.0
	Have	1	5.0
Burn date	1–6 months	2	10.0
	7 months to 1 year	18	90.0
Scar onset	3–6 months	17	85.0
	7–10 months	3	15.0

Table 2. Distribution of the study sample by history of burn

Variable	Ranking and intervals	Frequency	Percentage
Injury cause	Chemical burn	2	10.0
	Oil burn	4	20.0
	Thermal burn	14	70.0
Burn severity	Second-degree	14	70.0
	Third-degree	6	30.0
Blister	Don't have	5	25.0
	Have	15	75.0
Color of burn	Black	4	20.0
	Pink	1	5.0
	Pink, red	10	50.0
	White	5	25.0
Sensation	Intact	13	65.0
	Lost	7	35.0

Table 3. History of complications in the study sample

Variable	Ranking and intervals	Frequency	Percentage
Scar location	Hand	2	10.0
	Left arm	4	20.0
	Lower limb	6	30.0
	Upper limb	4	20.0
	Upper trunk	4	20.0
Symptoms	Itching	14	70.0
	Limitation of wrist movement	2	10.0
	Pain and limitation in elbow	4	20.0

Table 4. Management and prevention in the study sample

Variable	Ranking and intervals	Frequency	Percentage
Treatment received	Daily dressing change	5	25.0
	Excision graft	2	10.0
	Not treated previously	6	30.0
	Steroid injection	7	35.0
Scar prevention	Not specific	20	100.0

which is comparable to that of Kumar et al. (2022) [12] who showed that male patients experience more burn injuries than females because of their focus on professional availability and risk-taking behaviors. In common with the findings by Bloemen et al. (2009) [13], the study also identified that 55 % of patients came from rural areas highlighting that burn injuries are prevalent in rural populations with limited healthcare access and increased exposure to these dangerous conditions. In fact, 85 % of patients had no comorbidities and 15 % reported underlying medical conditions, which also highlights the conclusion by Finnerty et al. (2016) [14] that some comorbid conditions, including diabetes, and hypertension, can hinder wound healing and result in the formation of hypertrophic scars.

The frequency of burn injuries in this study was as follows: thermal burns — 70 %, oil burns — 20 % and chemical burns — 10 %, which align with Domenico et al. (2023) [15] who concluded that flame and scald burns are the leading cause of burn injuries worldwide. Burn grading revealed second-degree burns in 70 % of patients and third-degree burns in 30 %, consistent with Bloemen et al. (2009) [13] who reported that second-degree burns are more likely to develop hypertrophic scarring because the healing process can be prolonged, and fibroblasts are active at the site for longer. The color of admission burns was pink, red, or white, and blanching was observed in 10 % of patients only, which is similar to the findings of Finnerty et al. (2016) [14] that non-blanching burns are often indicative of deeper tissue damage and delayed healing. This also confirms research by Domenico et al. (2023) [15]: in 75 % of the cases, blisters were observed, emphasizing that blistering indicates deep dermal burns and greater potential for hypertrophic scar-

ring. Sensation assessment revealed intact sensation in 65 % of cases, while 35 % had a loss of sensation similar to Gauglitz et al. (2011) [11] who reported that deeper burns, which damage nerve endings, frequently result in sensory deficits and prolonged inflammation.

Similarly, the study also identified 30 % of patients developed hypertrophic scars and reported that itching was the most common symptom (70 %), followed by limited movement of the wrist (10 %), pain and limitation in elbow (20 %). This is in accordance with Bloemen et al. (2009) [13], which made the same conclusion that itching is the most common symptom of hypertrophic scars as a result of the excessive activity of mast cells and histamine release. Scars in areas subjected to high mechanical tension, including the lower extremities and upper trunk, tend to develop hypertrophic changes more frequently, which adds credence to the study conducted by Domenico et al. (2023) [15] showing that mechanical force on the healing tissue drives excessive collagen deposition and scar maturation.

Burn treatment was as follows: 35 % of patients received steroid injections, 25 % underwent daily dressing changes, 30 % were untreated in the past, and 10 % received excision grafting. This is consistent with Finnerty et al. (2016) [14] who noted that steroid injections are a good treatment for hypertrophic scars because they inhibit fibroblast proliferation.

Early excision and grafting have been shown to be critical modifiable interventions in improving outcomes by reducing prolonged inflammatory phases; yet, this was performed in only 10 % of cases — indeed lower than in other studies. Furthermore, 30 % of patients were untreated. Gauglitz et al. (2011) [11] found that untreated burns are at a much higher risk of developing serious hypertrophic scars.



Figure 1. Female, 16 years old, scaled burn on limbs, keloid scar 7 months after burn (third-degree), main symptom is itching, and treatment is daily dressing



Figure 2. Oil burn on the lower limb. Four months after it, there is still resistance to steroid injection sessions



Figure 3. Trauma to the lower limb due to RTA one year ago, hypertrophic scar appeared 3 months after trauma

Conclusions

These findings illustrate the clinical features and demographic variables of burn injuries in the study population. The most common categories were thermal burns, and the majority were second-degree burns. The most frequent site of scarring was the lower limb and itching developed as the most frequent symptom.

Recommendations

1. Management of burn wounds. Following a standard for treatments can minimize the risk of hypertrophic scars

through adequate cleansing, well-fitted dressing, and early intervention.

2. Strategies to prevent scarring in burn patients. Introduction of pressure therapy, silicone gel sheeting, and hydration techniques.

3. Patient education. Educate burn patients about adequate wound care, early scar management, and the importance of follow-up treatment to optimize outcomes.

4. Longitudinal studies. Design and execute more perspective, larger-scale studies addressing the risk factors and long-term outcomes of hypertrophic scars occurring in burn patients.



Figure 4. Old diabetic male with a history of upper limb burn (7 months ago), hypertrophic scar about 6 months after burn, good response to steroid injection after 3 sessions



Figure 5. A history of scald burn (third-degree) of 30–40 % of the upper limb, hypertrophic scar developed 3–6 months after it, post-resection of hypertrophic scar due to limitation of wrist movement, the result is 2–3 months after the surgery (excision and grafting)

References

1. Joglekar A, Song J, Golovko G, Jay J, Wolf S, El Ayadi A. Comparing the Effectiveness of Glucocorticoids in Preventing Hypertrophic Scar Diagnosis in Burn Patients. *Medicina (Kaunas)*. 2023 Nov 8;59(11):1970. doi: 10.3390/medicina59111970.
2. Ning X, Yang K, Shi W, Xu C. Comparison of hypertrophic scarring on a red Duroc pig and a Guangxi Mini Bama pig. *Scars Burn Heal*. 2020 Jun 25;6:2059513120930903. doi: 10.1177/2059513120930903.
3. Limandjaja GC, Niessen FB, Scheper RJ, Gibbs S. Hypertrophic scars and keloids: Overview of the evidence and practical guide for differentiating between these abnormal scars. *Exp Dermatol*. 2021 Jan;30(1):146-161. doi: 10.1111/exd.14121.
4. Anthonissen M, Daly D, Janssens T, van den Kerckhove E. The effects of conservative treatments on burn scars: A systematic review. *Burns*. 2016 May;42(3):508-518. doi: 10.1016/j.burns.2015.12.006.
5. Rabello FB, Souza CD, Farina Júnior JA. Update on hypertrophic scar treatment. *Clinics (Sao Paulo)*. 2014 Aug;69(8):565-573. doi: 10.6061/clinics/2014(08)11.
6. Nedelec B, Correa JA, de Oliveira A, LaSalle L, Perault I. Longitudinal burn scar quantification. *Burns*. 2014 Dec;40(8):1504-1512. doi: 10.1016/j.burns.2014.03.002.
7. Radzikowska-Büchner E, Lopuszyńska I, Flieger W, Tobiasz M, Maciejewski R, Flieger J. An Overview of Recent Developments in the Management of Burn Injuries. *Int J Mol Sci*. 2023 Nov 15;24(22):16357. doi: 10.3390/ijms242216357.
8. Spronk I, Polinder S, Haagsma JA, et al. Patient-reported scar quality of adults after burn injuries: A five-year multicenter follow-up study. *Wound Repair Regen*. 2019 Jul;27(4):406-414. doi: 10.1111/wrr.12709.
9. Garg SP, Weissman JP, Reddy NK, et al. Patient-reported Outcomes of Scar Impact: Comparing of Abdominoplasty, Breast Surgery, and Facial Surgery Patients. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2022 Oct 12;10(10):e4574. doi: 10.1097/GOX.0000000000004574.
10. Ahachi CN, Fadeyibi IO, Chira MK, Abikoye FO, Okpara CO. The socioeconomic impact of burns in Lagos, Nigeria: a one-year prospective study. *Ann Burns Fire Disasters*. 2017 Sep 30;30(3):205-209.
11. Gauglitz GG, Korting HC, Pavicic T, Ruzicka T, Jeschke MG. Hypertrophic scarring and keloids: pathomechanisms and current and emerging treatment strategies. *Mol Med*. 2011 Jan-Feb;17(1-2):113-125. doi: 10.2119/molmed.2009.00153.
12. Kumar R, Keshamma E, Kumari B, et al. Burn injury management, pathophysiology and its future perspectives. *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*. 2022;1(4):78-89. doi: 10.55544/jrasb.1.4.10.
13. Bloemen MC, van der Veer WM, Ulrich MM, van Zuijlen PP, Niessen FB, Middelkoop E. Prevention and curative management of hypertrophic scar formation. *Burns*. 2009 Jun;35(4):463-475. doi: 10.1016/j.burns.2008.07.016.
14. Finnerty CC, Jeschke MG, Branski LK, Barret JP, Dziewulski P, Herndon DN. Hypertrophic scarring: the greatest unmet challenge after burn injury. *Lancet*. 2016 Oct 1;388(10052):1427-1436. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31406-4.
15. Domenico P, Giuliana C, Daniele B, et al. Ear keloids: An innovative 3-steps combined treatment. *Skin Res Technol*. 2023 Nov;29(11):e13506. doi: 10.1111/srt.13506.

Received 02.08.2025

Revised 07.09.2025

Accepted 09.09.2025

Information about author

Rabab Abbas Hasan, College of Medicine, University of Thi-Qar, Ministry of Health, Thi-Qar, Iraq; e-mail: rawaqjasim@gmail.com

Conflicts of interests. Author declares the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Rabab Abbas Hasan

College of Medicine, University of Thi-Qar, Ministry of Health, Thi-Qar, Iraq

Частота виникнення гіпертрофічних рубців у пацієнтів з опіками

Резюме. Актуальність. Гіпертрофічні рубці являють собою аномальну реакцію на опікові травми та є результатом надмірного відкладення колагену, тривалої дії медіаторів запалення і надмірної проліферації фібробластів. Вони утворюють характерну підняту, потовщену й еритематозну тканину, що залишається в межах початкової рани, але може призвести до значних естетичних та функціональних порушень. Якщо загоєння рани затримується або відбувається неправильно, гіпертрофічні рубці можуть зберігатися місяцями або навіть роками на відміну від келоїдних рубців, що можуть ніколи не регресувати. **Мета:** визначити частоту та функціональні характеристики гіпертрофічних рубців у пацієнтів з опіками. **Матеріали та методи.** Це перехресне дослідження проведене в навчальній лікарні Аль-Насірія (провінція Ті-Кар, Ірак) у період з 1 листопада 2024 року до 1 лютого 2025 року. Двадцять учасників були відібрані випадковим чином. Для збору даних, включно з демографічними параметрами та оцінкою опікових травм (причина, тяжкість, локалізація опіку, ознаки і симптоми, утворення гіпертрофічного рубця й лікувальні втручання), використовували структуро-

вані інтерв'ю та анкетування. Етичні міркування забезпечували анонімність і конфіденційність пацієнтів. **Результати.** У дослідженні взяли участь 20 осіб, по 10 у кожному віковому діапазоні (15–30 і 31–50 років). 60 % вибірки становили чоловіки, а 55 % пацієнтів були з сільської місцевості. Найчастішою травмою був термічний опік (70 %), далі опіки олією (20 %) та хімічні опіки (10 %). Опіки другого ступеня були найпоширенішими (70 %), 35 % учасників скаржилися на втрату чутливості. Найчастішим місцем утворення рубців була нижня кінцівка (30 %). Найбільш поширеним клінічним проявом був свербіж (70 %), потім біль та обмеження рухливості (20 %). Лікування включало ін'єкції стероїдів (35 %) та щоденну зміну пов'язок (25 %), однак 30 % пацієнтів не отримували жодного лікування. Заходи щодо профілактики рубцювання не застосовували (100 %). **Висновки.** Найпоширенішою категорією опіків були термічні, більшість із них — другого ступеня. Найчастіше рубці формувалися на нижніх кінцівках, а свербіж був найпоширенішим симптомом.

Ключові слова: гіпертрофічний рубець; опік; свербіж; опіки другого ступеня; термічний опік

Климовицький Ф.В.¹, Безсмертний Ю.О.², Шевчук В.І.², Макогончук А.В.²,
Безсмертна Г.В.²

¹Донецький національний медичний університет МОЗ України, м. Кропивницький, Україна

²Університетська клініка Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова,
м. Вінниця, Україна

Реконструктивні операції ампутаційних кукс гомілок внаслідок бойової травми

Резюме. Актуальність. Повномасштабні воєнні дії супроводжуються зростанням кількості поранених із тяжкими ушкодженнями кінцівок, що часто потребують ампутацій. Незважаючи на вдосконалення хірургічних технологій, у значної частини пацієнтів після ампутації нижніх кінцівок формуються патологічно змінені кукси, що ускладнює їх протезування та подальшу реабілітацію. **Мета:** підвищення ефективності реконструктивно-відновного лікування пацієнтів із дефектами ампутаційних кукс нижніх кінцівок після бойової травми шляхом удосконалення способів ампутаційної пластики. **Матеріали та методи.** Проведено клінічне обстеження та хірургічне лікування 126 пацієнтів із дефектами ампутаційних кукс гомілки, серед яких переважали посттравматичні ураження, зумовлені мінно-вибуховими та вогнепальними пораненнями. Виконано 137 реконструктивних оперативних втручань, серед яких міопластичні, остеопластичні та шкірно-підшкірні операції. Для оцінки результатів застосовано рентгенологічні, ультразвукові та гістологічні методи дослідження. Тривалість спостереження становила від 3 місяців до 5 років. **Результати.** У всіх пацієнтів отримано стійкий позитивний результат із формуванням еластичної, безболісної та функціонально повноцінної кукси, придатної для сучасного протезування. Застосування розроблених і вдосконалених способів шкірної, м'язової та кісткової пластики сприяло підвищенню опороздатності кукси, рівномірному розподілу навантаження в приймальній гільзі протеза та зменшенню відсотка неправильно сформованих кукс. **Висновки.** Закриття дефектів невеликими шкірно-підшкірними клаптями є методом вибору при реконструкції ампутаційних кукс гомілок після бойових травм. Фіксація м'язів до кістки дозволяє усунути вади кукси та отримати пружну м'язову куксу. Формування міжкісткового синостозу різними кістковопластичними методами суттєво поліпшує функціональні властивості кукси та сприяє ефективному протезуванню.

Ключові слова: бойова травма; ампутаційна кукса; реконструктивна хірургія; міопластика; остеопластика

Вступ

Сучасна війна супроводжується значною кількістю множинних і поєднаних уражень опорно-рухового апарату, серед яких переважають мінно-вибухові та вогнепальні поранення нижніх кінцівок. У частині таких випадків первинним етапом лікування є ампутація [1–3]. Проте в передових районах це втручання має попередній характер. Воно часто спрямоване на врятування життя потерпілого. Усу-

нення вад кукси покладається на тиліві медичні заклади [4–6].

Бойова травма відрізняється від побутової масштабом руйнування тканин, забрудненням рани, наявністю зон вторинного некрозу та високим ризиком інфекційних ускладнень [5, 7–10]. Це зумовлює розвиток деформацій кукси, рубцевих контрактур, болючих невром і зниження опороздатності, що істотно ускладнює протезування та реабілітацію поранених [7, 8, 11–13].

© «Травма» / «Trauma» («Trauma»), 2025

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2025

Для кореспонденції: Безсмертний Юрій Олександрович, доктор медичних наук, професор, завідувач відділення реконструктивної ортопедії та травматології, Університетська клініка Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова, Хмельницьке шосе, 104, м. Вінниця, 21100, Україна; e-mail: bezsmertnyiurii@gmail.com; тел.: +380 (97) 281-51-60

For correspondence: Yuriy Bezsmertnyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Reconstructive Orthopedics and Traumatology, University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Khmelnytsky Highway, 104, Vinnytsia, 21100, Ukraine; e-mail: bezsmertnyiurii@gmail.com; phone: +380 (97) 281-51-60

Full list of authors information is available at the end of the article.

Вітчизняні й зарубіжні дослідження [5, 14–16] підтверджують ефективність комплексного підходу до реконструкції ампутаційних кукс. У працях [16–18] описано метод Ертла (Ertl), що передбачає формування кісткового містка між залишками великогомілкової та малогомілкової кісток із використанням періосту та частини кортикального шару. Хоча метод забезпечує добрий функціональний результат, він є технічно складним і може супроводжуватися ускладненнями, як-от зміщення м'язів або деформація кісткового містка.

Модифікований спосіб кістковопластичного формування синостозу з розширенням площини зрізу великогомілкової кістки дозволяє оптимізувати розподіл осьового навантаження і поліпшити трофіку тканин. На основі ідей Вейса [19] вдосконалено методику фіксації м'язів до кістки, що підвищує стабільність м'язово-кісткових структур кукси.

Функціональна повноцінність ампутованої кінцівки визначається станом м'язів, кісток і шкірного покриву, тому реконструктивні втручання мають передбачати поєднану корекцію цих компонентів. Розвиток сучасного протезування значно розширює можливості реабілітації та соціальної адаптації поранених.

Отже, одним із пріоритетних завдань сучасної медицини є вдосконалення та клінічне впровадження ефективних реконструктивних методик формування повноцінної функціональної кукси нижньої кінцівки після бойових травм.

Мета: підвищити ефективність реконструктивно-відновного лікування пацієнтів із дефектами ампутаційних кукс нижніх кінцівок після бойової травми шляхом удосконалення методик ампутаційної пластики.

Матеріали та методи

Під нашим спостереженням перебували 126 пацієнтів із вадами та захворюваннями ампутаційних кукс гомілки віком від 19 до 52 років. Термін після первинної



Рисунок 1. Розподіл хворих за причиною ампутації

ампутації становив від 2 до 10 місяців ($5,4 \pm 1,3$ місяця). Тривалість спостереження становила від 3 місяців до 5 років. Основною причиною ампутацій були бойові поранення нижніх кінцівок — у 117 (92,8 %) пацієнтів, серед яких переважали мінно-вибухові ураження (93 випадки, 73,8 %) та вогнепальні поранення (24 випадки, 19,0 %). Інші причини включали обмороження (6 випадків, 4,8 %) та судинні захворювання (3 випадки, 2,4 %) (рис. 1).

Клінічне обстеження включало оцінку рівня ампутації, форми кукси, стану м'яких тканин, рубця, м'язової сили, кровообігу, рухливості суглобів, наявності болю. Тривалість користування протезом оцінювалася протягом добового циклу. Загальна характеристика вад і захворювань ампутаційних кукс наведена в табл. 1.

Проводили стандартну рентгенографію у двох проєкціях та ультразвукове дослідження апаратом Siemens Sonoline SL-450.

Морфологічні дослідження здійснювали на біопсійному матеріалі від 14 пацієнтів під час реампутацій.

Таблиця 1. Характеристика вад і захворювань ампутаційних кукс

Тип патології	Кількість пацієнтів	Реампутації		Інші операції
		Міопластичні	Кістково-пластичні	
Болючі невроми, лігатурні нориці	2	–	–	2
Спаяні з кісткою рубці	29	16	11	3
Занадто довгі та короткі кукси	12	3	9	3
Виступаючий опил кісток	18	12	6	4
Остеомієліт кінця кукси	5	2	–	3
Бурсити	5	3	2	–
Високе розташування м'яких тканин	5	2	2	1
Прикріплення м'язів до рубців	20	9	11	3
Відхилення залишку малогомілкової кістки	12	6	5	1
Надмірна рухливість залишку малогомілкової кістки	5	3	2	2
Неправильний опил кісток	13	5	5	3
Загалом	126	61	53	25

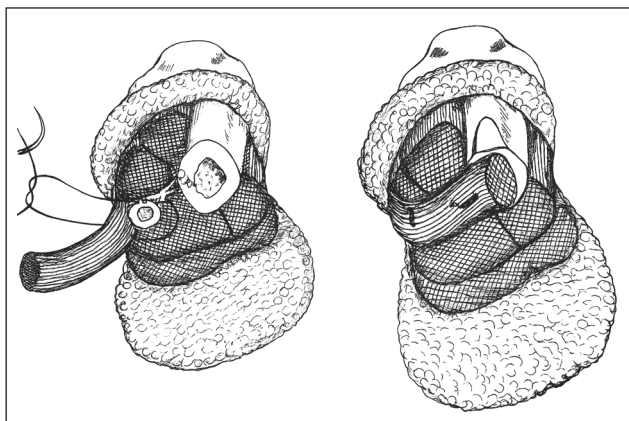


Рисунок 2. Стабілізація залишку малоомілкової кістки довгим малоомілковим м'язом

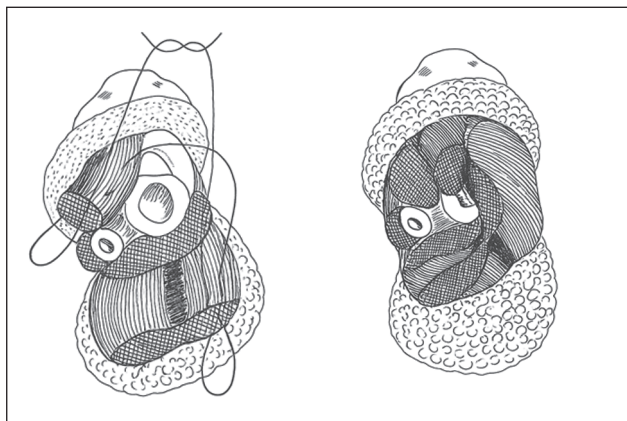


Рисунок 3. М'язова пластика кукси гомілки з укріпленням гребеня великогомілкової кістки

Остеопластичні реконструкції полягали у формуванні синостозу між великогомілковою та малоомілковою кістками за допомогою автотрансплантатів із відсічених фрагментів. Показаннями до остеопластичних реконструкцій були надлишок м'яких тканин, неправильний кістковий опил, рухливість або відхилення малоомілкової кістки, надмірна довжина кукси, рубцево-спайкові та патологічні зміни шкіри.

При міопластичній стабілізації надмірної рухливості залишку малоомілкової кістки довгий малоомілковий м'яз фіксували спочатку до залишкової кінцівки, а потім до зовнішньої поверхні великогомілкової кістки (рис. 2).

При виступаючому гребені великогомілкової кістки бурсу препарували. Гребінь виділяли і спилювали під кутом 45° . У верхній частині цього кісткового розрізу робили поперечний канал довжиною 0,6–1 см без проникнення в кістково-мозковий канал. Через канал проводили шви, що розсмоктовуються. Одним вільним кінцем підшивали латерально передній край великогомілкового м'яза, іншим — медіальну головку литкового м'яза. Лігатури зав'язували, гребінь закривали. Після цього один вільний кінець нитки проводили через латеральну, а другий — через медіальну головку литкового м'яза U-подібно з поверненням до переднього краю великогомілкового м'яза. Нитки зав'язували. На операційному столі було отримано еластичну м'язову куксу. Якщо м'язів було забагато, проводилася висока резекція камбалоподібного м'яза (рис. 3).

Обов'язковим було вкорочення великогомілкового, поверхневого та глибокого малоомілкового нервів та заднього шкірного нерва.

Кістковопластична реконструкція передбачала формування синостозу великогомілкової кістки за допомогою вільної та невільної пластики.

При короткій куксі з рубцевими змінами, що прилягають до кістки, останню препарували. Виконували реампутацію з вкороченням кістки та м'язовою пластикою з фіксацією м'язів до кістки. Для подовження кукси проводили остеотомію великогомілкової кістки з подальшою distraкцією та формуванням регенерату. Після досягнення необхідної довжини та достатньої міцності регенерату виготовляли протез.

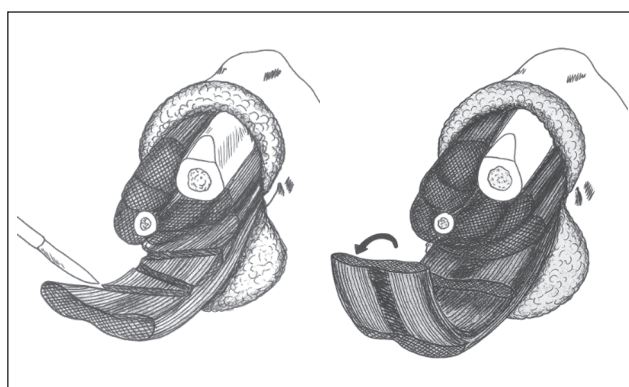


Рисунок 4. Схеми операцій м'язової пластики кукси гомілки з подовженням (Z-подовження та язикоподібне подовження) литкового м'яза

При залишковій кінцівці на рівні нижньої третини з рубцевими змінами в дистальній ділянці та надмірною довжиною кукси проводили реампутацію на рівні середньої та нижньої третини гомілки. Частіше застосовували економну реампутацію з одночасною шкірною пластикою. Розріз шкіри виконували атипово, з урахуванням розташування рубцевих тканин. Після розсічення та дисекції рубців виконували шкірну пластику масивним шкірно-підшкірним клаптом, переміщеним із прилеглих ділянок залишкової кінцівки, коліна або стегна. Перед цим завжди проводили інтенсивну підготовку донорської ділянки для забезпечення її більшої рухливості.

На куксі середньої третини гомілки при дефектах шкіри на передній або задньолатеральній поверхні шкіри з підшкірною клітковиною відокремлювали по передній або зовнішній поверхні кукси до розмірів дефекту. Протилежний край рани мобілізували по всій довжині розрізу, шви накладали без натягу. У разі великих дефектів передньолатеральної поверхні ампутаційної кукси верхньої третини гомілки застосовували невільну шкірну пластику переміщенням клаптом з передньозовнішньої поверхні стегна, що дозволяло повністю закрити шкірні дефекти розміром до 70–80 см² (рис. 4).



Рисунок 5. Невільна шкірна пластика ампутаційної кукси гомілки масивним переміщенням клаптем

Водночас зі шкірною пластикою виконували видалення остеофітів, резекцію нервових стовбурів над зоною навантаження кукси в протезі, обробку гребеня та кісткового опилю.

Результати

Хірургічне видалення лігатурних нориць із ушиванням та дрениванням рани призводило до її загоєння протягом 10–16 днів. Видалення бурси в ділянці гребеня великогомілкової кістки зазвичай супроводжувалося спилуванням гребеня та ушиванням рани. У всіх пацієнтів спостерігалось повне загоєння рани.

Надмірна рухливість малогомілкової кістки в більшості випадків усувалася її стабілізацією за допомогою довгого малогомілкового м'яза. Усунення надмірної рухливості було досягнуто у всіх пацієнтів.

Шкірно-пластична реконструкція кукс на рівні середньої та верхньої третини гомілки була ускладнена. У більшості пацієнтів ділянки кукси та прилеглі зони,

критично важливі з функціональної точки зору, були вкриті рубцевою тканиною, щільно спаяною з підлеглими структурами та легко ушкоджуваною при мінімальному навантаженні. У інших спостерігалися тривало незагоєні рани, болючі або виразкові рубці, трофічні виразки, ділянки зміненої шкіри з ознаками атрофії та дегенерації, ущільнені рубці, що спричинювали деформацію кукси. У двох випадках при закритті дефекту шкіри в ранньому післяопераційному періоді через натяг шкіри відбулося часткове некротичне ураження країв клаптя. Подібне ускладнення спостерігалось при шкірній пластичі великого дефекту на передній поверхні кукси гомілки, коли протилежний край рани був недостатньо мобілізований після закриття великого дефекту площею 75 см². Частковий некроз усунено шляхом резекції ураженої ділянки та повторного ушивання рани.

Формування кукси шляхом фіксації м'язів до кісткового опилю дозволяло отримати пружні м'язові кукси з добре закритими кістками. У деяких випадках виника-

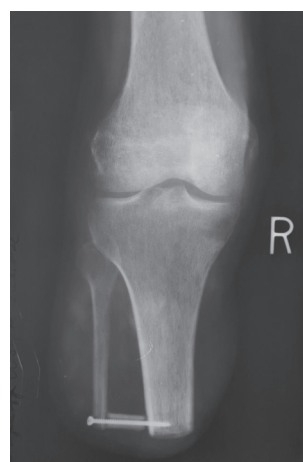
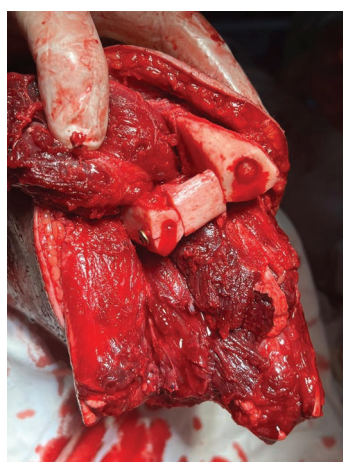
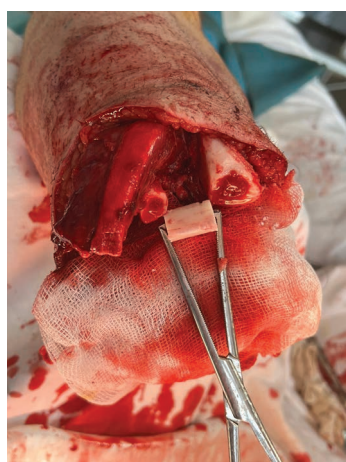


Рисунок 6. Формування синостозу гомілкових кісток із використанням автотрансплантата з малогомілкової кістки



Рисунок 7. Формування синостозу гомілкових кісток із використанням автотрансплантата з великогомілкової кістки

ли труднощі при натягу скороченого литкового м'язу до гребеня великогомілкової кістки. Для уникнення надмірного натягу м'яз подовжували на дві третини його товщини послабляючими розрізами (рис. 5). Після міопластичних операцій формування кісткової закриваючої пластини завершувалося протягом 2–3 місяців.

Хороші результати були отримані при формуванні синостозу гомілкових кісток із використанням різних трансплантатів. Застосовували кілька технік залежно від клінічних умов. З ампутованого сегмента малогомілкової кістки формували трубчастий трансплантат довжиною, що відповідала або була трохи меншою за розмір міжкісткового проміжку. Трансплантат розміщували перпендикулярно до гомілкових кісток між їх боковими поверхнями (рис. 6).

Через кінець малогомілкової кістки проводили спицю з опорною платформою через кістковий канал трансплантата та великогомілкову кістку. Друга спиця перетинала першу через великогомілкову кістку. Спиці фіксували в кільці апарата Ілізарова, створюючи компресію. Проксимальне кільце, на якому фіксували проведені навхрест черезкістково спиці, монтували у верхній третині гомілки. Кільця з'єднували направляючими штангами. Ця методика забезпечує стабільність трансплантата і запобігає його зміщенню. У деяких пацієнтів трансплантат фіксували додатково за допомогою гвинтів. Формування кісткового синостозу відбувалося протягом 6–7 тижнів.

Якщо куска мала достатню довжину, кістки спилювали зсередини назад. З частини великогомілкової кістки, що підлягала видаленню, виготовляли трапецієподібний трансплантат. Сторони трапеції відповідали площинам опилів великогомілкової та малогомілкової кісток, а довжина більшої основи дорівнювала відстані між їх найнижчими точками. Трансплантат розміщували між кістковими опилами, закриваючи отвори кісткових каналів (рис. 7).

Для фіксації через кінці обох кісток і трансплантата з боку малогомілкової кістки електродрилем проводи-

ли спиці з опорною платформою. Остаточну фіксацію здійснювали апаратом Ілізарова.

Інший варіант операції дозволяв незначне вкорочення кукси (до 1 см) із формуванням синостозу. Великогомілкову кістку спилювали по діагоналі зверху вниз і зовні всередину, формуючи трансплантат у вигляді трапеції. Менша основа трапеції відповідала ширині міжкісткового проміжку, а більша — відстані між внутрішніми краями великогомілкової та малогомілкової кісток. Трансплантат повертали на 180° та поєднували його сторони з тибіальною та латеральною поверхнями малогомілкової кістки. Фіксацію виконували за допомогою апарата Ілізарова. Період стабілізації становив 6–7 тижнів.

Метод формування синостозу з трансплантатом великогомілкової кістки без додаткових засобів фіксації полягав у такому: брали фрагмент великогомілкової кістки довжиною, що дорівнює відстані між зовнішньою та внутрішньою точками кістки. У ньому формували паз, ширина якого дорівнює половині передньозаднього розміру кістки. На кінці кістки формували паз, глибина якого відповідає товщині кортикального шару трансплантата довжиною 1 см у фронтальній площині. Трансплантат вставляли в паз, при цьому задня поверхня великогомілкової кістки та куска малогомілкової кістки також розташовувалися у сформованому отворі. Цей метод забезпечував надійне утримання трансплантата, а формування синостозу відбувалося протягом 8–10 тижнів.

Додаткова фіксація не була необхідна при синостозі гомілкових кісток із трубчастим трансплантатом, встановленим через малогомілкову кістку. З частини великогомілкової кістки, що підлягала видаленню, виготовляли безперервний трубчастий трансплантат довжиною 3–4 см, зачищали його від м'яких тканин і щільно встановлювали в куксу малогомілкової кістки. Трансплантат розташовували так, щоб одна з його трьох поверхонь щільно прилягала до зовнішньої поверхні великогомілкової кістки. Передній великого-

мілковий та литковий м'язи фіксували до трансплантата. Тривалість фіксації становила 6–8 тижнів.

У разі короткої кукси великогомілкової кістки із залишком малогомілкової кістки, який постійно відхилявся назад і назовні через натяг двоголового м'яза, створюючи булавоподібну деформацію та унеможливаючи протезування, виконували одну з остеопластичних операцій.

Одна з методик передбачала формування синостозу за рахунок тонкого автотрансплантата з гребеня великогомілкової кістки. З гребеня великогомілкової кістки виготовляли трансплантат у формі цвяха. Залишок малогомілкової кістки виводили у фізіологічне положення; при необхідності проводили Z-подібне подовження сухожилля двоголового м'яза. Електродрилем із свердлом відповідного діаметра формували поперечні сліпі канали на зовнішній поверхні великогомілкової кістки та внутрішній поверхні малогомілкової кістки, у які вводили трансплантат. Після цього виконували м'язову пластику та ушивали рану. Синостоз формувався протягом 6–7 тижнів.

Синостоз кісток гомілки при коротких куксах також може бути досягнутий шляхом компресії малогомілкової кістки до великогомілкової за допомогою апарата Ілізарова або шляхом розміщення кукси малогомілкової кістки в борозні вздовж зовнішньої поверхні великогомілкової кістки. Період фіксації становив 2 місяці.

Через 4 тижні після операції ультразвукове дослідження показало зменшення діастазу між трансплантатом та кісткою. Відмічалось збільшення ехопозитивних включень із трансформацією у лінійні структури, орієнтовані вздовж осі кукси. У деяких випадках виявлялися кісткові містки у вигляді тонких гіперехогенних ліній.

На 8-му тижні ультразвукова картина демонструвала безперервну гіперехогенну структуру з нерівномірною гіперехогенною лінією та акустичною тінню, що свідчило про повне зрощення трансплантата з кісткою.

Показання до остеопластичної реконструктивної операції включали надлишок м'яких тканин, прикріплення м'язів до рубців, неправильний опил кісток, відхилення малогомілкової кістки, надмірну рухливість, надто довгу куксу, рубцеву та змінену шкіру.

М'язова пластика виконувалася у всіх випадках для укріплення кісток і забезпечення функціональної цілості кукси. Серйозних ускладнень не виявлено; локальні післяопераційні гематоми потребували активного дренивання.

Одужання досягнуто у всіх пацієнтів.

Рациональне поєднання шкірної, м'язової та кісткової пластики, дбайливе поводження з м'язами та їх фіксація до кісткового опилу запобігали скороченню м'язів, виступанню кісткового опилу та надлишку м'яких тканин. Згладжування нерівностей лінії кісткового опилу та формування кісткового блоку великогомілкової кістки запобігали дефектам кукс.

Усім пацієнтам проведено протезування легкими протезними конструкціями, такими як напівконтактний протез. Ці протези естетичні, легкі та прості у ви-

користанні. Вони забезпечують максимальний контакт між куксою та гільзою протеза, а також навантаження на торець. Кровообіг у куксі задовільний. Трофічних порушень немає. Виключена наявність хронічного набряку в дистальній частині кукси. Атрофія стегнових м'язів незначна. Майже всі пацієнти використовують протез.

Оцінюючи результати ампутацій з точки зору протезування, слід підкреслити, що протезна придатність кукс залежить від рівня ампутації. Кукса після кісткової пластики має дещо кращу опорну поверхню завдяки більшому діаметру площини. Хоча такі кукси не можна вважати оптимальними, формування розширеного безболісного дистального відділу забезпечує задовільний контакт із протезом та комфортне навантаження на кінцівку.

Кукси гомілки на рівні середньої третини добре укріплені м'язами. Збільшення площі поперечного перерізу дозволяє переносити до 60 % маси тіла. Кукси є пружними, еластичними та безболісними. Завдяки формуванню синостозу та розширенню зони опилу, а отже, підвищеній навантажувальній здатності дистального відділу залишкової кінцівки ця частина забезпечує оптимальний контакт із протезом.

Обговорення

Відновлення повноцінної функціональної шкіри залишкової кінцівки є надзвичайно важливим аспектом реконструктивної хірургії. Шкірна пластика відіграє ключову роль не лише у відновленні м'яких тканин, а й у комплексній м'язовій та кістковій реконструкції. Використання невідірваних шкірних клаптів на широкій основі дозволяє зберегти довжину кістки, що позитивно впливає на функціональні можливості кукси під час протезування. Переміщена шкіра є гомогенною з прилеглими тканинами, зберігає природний кровообіг та іннервацію. Особливо важливу роль відіграє підшкірна жирова клітковина, яка забезпечує легке переміщення тканин і усунення глибоких дефектів. Шкірно-підшкірний клапоть слід формувати на одному рівні з межами здорової тканини та відділяти від фасції єдиним блоком. У разі натягу шкіри її необхідно розсікати без ушкодження колагенових волокон. Закриття дефектів залишкової кінцівки шляхом переміщення шкірно-підшкірного клаптя з передньої поверхні колінного суглоба та стегна є особливо ефективним, якщо під час підготовки клаптя враховується тренування його рухливості та еластичності.

М'язова пластика є беззаперечною складовою частиною реконструкції кукс гомілки. Фіксація м'язів до кістки дозволяє укріпити кісткові опили, гребінь кістки та забезпечити щільне закриття кісткового каналу. Рациональне поєднання стабілізації залишку малогомілкової кістки довгим малогомілковим м'язом із відновленням передніх та задніх міжм'язових перетинків та формуванням шару, що перекриває гребінь великогомілкової кістки, із фіксацією литкового м'яза до гребеня великогомілкової кістки, забезпечує еластичність м'язової кукси. Фіксація м'язів до кістки під час кістко-

вопластичних операцій виконує аналогічну функцію. Надалі м'язи, зшиті на кінці кукси, перетворюються на щільну фіброзну тканину з органною будовою, що слугує надійною прокладкою між кісткою та протезом. Бічні поверхні кукси зазнають атрофії м'язів, ступінь якої залежить від використання протеза.

Техніка кісткової пластики на куксах гомілки є порівняно нескладною та дозволяє хірургу обирати оптимальний варіант для кожного пацієнта. Репаративний процес зазвичай проходить без ускладнень: не зафіксовано зміщень або неправильного розташування трансплантата. Закриття кісткової порожнини створює сприятливі умови для нормального репаративного процесу. У жодному випадку не спостерігалось додаткового кісткоутворення на бічних поверхнях кістки у вигляді кісткових і хрящових регенератів. При надійній фіксації трансплантата синостоз формується протягом 6–8 тижнів.

Аналіз ультразвукових досліджень показав, що протягом 4 тижнів відбувається активна консолідація трансплантата з кісткою, іноді з формуванням кісткових містків. До 8 тижнів спостерігалось завершення консолідації.

Попередні дослідження [16] дозволяють стверджувати, що при кістковій пластичі із синостозом стабільність і ступінь навантаження кукси більш ніж у чотири рази вищі, ніж без нього. Останнє особливо важливо, оскільки при функціональному навантаженні в кістках виникають пружні деформації, що викликають гідродинамічний ефект, що сприяє нормальній внутрішньокістковій мікроциркуляції, а отже, і трофіці кістки.

Проведені морфологічні дослідження свідчать про те, що в кістковій тканині кінців кукс відбувалися процеси фізіологічної реорганізації з повним балансом остеогенезу та остеорезорбції. Дослідження [16] демонструють, що при кістковій пластичі з формуванням синостозу стабільність і ступінь навантаження кукси перевищують аналогічні показники у 4 рази порівняно з куксами без синостозу. Це має особливе значення, оскільки під час функціонального навантаження відбуваються еластичні деформації кістки, що створюють гідродинамічний ефект і сприяють нормальній внутрішньокістковій мікроциркуляції, а отже, підтримують трофіку кістки.

Кістковий блок великогомілкової кістки після ампутації зберігає компактну структуру зрілої кісткової тканини, що підтверджує повну функціональну відповідність кінців кукс анатомічній структурі кістки.

Висновки

1. Використання невеликого шкірно-підшкірного клаптя є методом вибору для закриття дефектів шкіри ампутаційних кукс нижніх кінцівок.

2. Фіксація м'язів до кістки дозволяє усунути дефекти кісткових опилів і гребенів, формуючи еластичну м'язову куксу із замкнутою кістково-мозковою порожниною, що підвищує стабільність кукси, поліпшує її механічну міцність і функціональні можливості при протезуванні.

3. Формування синостозу різними методами суттєво підвищує навантажувальну здатність і механічну стійкість ампутаційної кукси, забезпечуючи оптимальний контакт із протезом та сприяючи ефективному і безболісному протезуванню.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Внесок авторів. Климовицький Ф.В. — остаточне затвердження статті; Безсмертний Ю.О. — концепція та дизайн роботи, написання статті; Макогончук А.В., Безсмертна Г.В. — збір та аналіз даних; Шевчук В.І. — критичний огляд.

Список літератури

1. Levack AE, Reider L, Odum S, et al. Outcomes of amputation and limb salvage in combat injuries: Does level of injury matter? A secondary analysis of Military Extremity Trauma Amputation/Limb Salvage (METALS) study data. *Injury*. 2025;56(4):112220. doi: 10.1016/j.injury.2025.112220.
2. Petfield JL, Lewandowski LR, Stewart L, et al. IDCRP Combat-Related Extremity Wound Infection Research. *Mil Med*. 2022;187(2):25–33. doi: 10.1093/milmed/usab065.
3. Tropf JG, Hoyt BW, Walsh SA, et al. Long-Term Health Outcomes of Limb Salvage Compared with Amputation for Combat-Related Trauma. *J Bone Joint Surg Am*. 2023;105(23):1867–1874. doi: 10.2106/JBJS.22.01284.
4. Butler F, Holcomb JB, Dorlac W, et al. Who needs a tourniquet? And who does not? Lessons learned from a review of tourniquet use in the Russo-Ukrainian war. *J Trauma Acute Care Surg*. 2024;97(1):S45–S54. doi: 10.1097/TA.0000000000004395.
5. Grubor P, Milicevic S, Grubor M, Meccariello L. Treatment of bone defects in war wounds: retrospective study. *Med Arch*. 2015;69(4):260–264. doi: 10.5455/medarch.2015.69.260–264.
6. Rollo G, Falzarano G, Ronga M, et al. Challenges in the management of floating knee injuries: results of treatment and outcomes of 224 consecutive cases in 10 years. *Injury*. 2019;50(4):S30–S38. doi: 10.1016/j.injury.2019.03.016.
7. Allami M, Faraji E, Mohammadzadeh F, Soroush M. Chronic musculoskeletal pain, phantom sensation, phantom and stump pain in veterans with unilateral below-knee amputation. *Scand J Pain*. 2019;19(4):779–787. doi: 10.1515/sjpain-2019-0045.
8. Buch N, Qerama E, Finnerup B, Nikolajsen NL. Neuro-mas and postamputation pain. *Pain*. 2020;161(1):147–155. doi: 10.1097/j.pain.0000000000001705.
9. Buchheit T, Hsia H, Cooter M, et al. The impact of surgical amputation and valproic acid on pain and functional trajectory: results from the veterans integrated pain evaluation research (VIPER) randomized, double-blinded placebo-controlled trial. *Pain Med*. 2019;20(10):2004–2017. doi: 10.1093/pm/pnz067.
10. Ahuja V, Thapa D, Ghai B. Strategies for prevention of lower limb post-amputation pain: A clinical narrative review. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol*. 2018;34(4):439–449. doi: 10.4103/joacp.JOACP_126_17.
11. Ahmed A, Bhatnagar S, Mishra S, et al. Prevalence of phantom limb pain, stump pain, and phantom limb sensation

among the amputated cancer patients in India: a prospective, observational study. *Indian J Palliat Care*. 2017;23(1):24-35. doi: 10.4103/0973-1075.197944.

12. Bosanquet D, Glasbey J, Stimpson A, et al. Systematic review and meta-analysis of the efficacy of perineural local anaesthetic catheters after major lower limb amputation. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2015;50(2):241-9. doi: 10.1016/j.ejvs.2015.04.030.

13. Dumanian G, Potter B, Mioton L, et al. Targeted muscle reinnervation treats neuroma and phantom pain in major limb amputees: a randomized clinical trial. *Ann Surg*. 2019;270(2):238-246. doi: 10.1097/SLA.0000000000003088.

14. Gilmore C, Ilfeld B, Rosenow J, et al. Percutaneous peripheral nerve stimulation for the treatment of chronic neuropathic postamputation pain: a multicenter, randomized, placebo-controlled trial. *Reg Anesth Pain Med*. 2019;44(6):637-645. doi: 10.1136/rapm-2018-100109.

15. Tosun B, Selek O, Gok U, Tosun O. Medial gastrocnemius muscle flap for the reconstruction of unhealed amputation

stumps. *J Wound Care*. 2017;26(8):504-507. doi: 10.12968/jowc.2017.26.8.504.

16. Bezsmertnyi Y, Shevchuk V, Grushko O, et al. Information model for the evaluation of the efficiency of osteoplasty performing in case of amputations on below knee. *Proc. SPIE*. 2018. <https://dspace.vnmu.edu.ua/123456789/4952>.

17. Plucknette B, Krueger C, Rivera J, Wenke J. Combat-related bridge synostosis versus traditional transtibial amputation: comparison of military-specific outcomes. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2016;11(1):5-11. doi: 10.1007/s11751-015-0240-4.

18. Taylor B, Poka A. Osteomyoplastic Transtibial Amputation: The Ertl technique. *J Am Acad Orthop Surg*. 2016 Apr;24(4):259-65. doi: 10.5435/JAAOS-D-15-00026.

19. Weiss M. Myoplastic amputations. Immediate Prosthesis and early amputation. *Bethesda (Maryland): National Library of Medicine*; 1971.

Отримано/Received 05.09.2025

Рецензовано/Revised 20.10.2025

Прийнято до друку/Accepted 06.11.2025

Information about authors

Fedir Klymovytskyi, MD, DSc, PhD, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: klimovitskiyfedor@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0566-5808>

Yurii Bezsmertnyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Reconstructive Orthopedics and Traumatology, University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: bezsmertnyiurii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1388-7910002-1388-7910>

Viktor Shevchuk, MD, DSc, PhD, Professor, Deputy Director for Scientific Work, University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: shevchukndrii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1105-4795>

Andrii Makohonchuk, MD, PhD, Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics, University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: makogonav5@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5031-5217>

Halyna Bezsmertna, MD, PhD, Leading Researcher, University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: bezsmertnahalyna@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1505-4872>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. F.V. Klymovytskyi — final approval of the article; Yu.O. Bezsmertnyi — concept and design of the work, writing the article; A.V. Makohonchuk, H.V. Bezsmertna — data collection and analysis; V.I. Shevchuk — critical review.

F.V. Klymovytskyi¹, Yu.O. Bezsmertnyi², V.I. Shevchuk², A.V. Makohonchuk², H.V. Bezsmertna²

¹Donetsk National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Kropyvnytskyi, Ukraine

²University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine

Reconstructive surgeries of below-knee amputation stumps resulting from combat trauma

Abstract. Background. Full-scale military operations are accompanied by an increase in the number of wounded with severe limb injuries, often requiring amputation. Despite advances in surgical technology, a significant proportion of patients develop pathologically altered stumps after lower limb amputation, complicating prosthetics and further rehabilitation. Aim: to improve the effectiveness of reconstructive and restorative treatment of patients with lower limb amputation stump defects after combat trauma by improving amputation plastic surgery techniques. **Materials and methods.** Clinical examination and surgical treatment were performed on 126 patients with lower limb amputation stump defects, among which post-traumatic lesions caused by mine-blast and gunshot wounds prevailed. A total of 137 reconstructive surgical procedures were performed, including myoplastic, osteoplastic, and skin-subcutaneous operations. Radiographic, ultrasonic, and histological methods were used to evaluate the outcomes. The

duration of follow-up ranged from 3 months to 5 years. **Results.** All patients achieved stable positive results with the formation of an elastic, painless and functionally complete stump suitable for modern prosthetics. The use of developed and improved methods of skin, muscle and bone plastic surgery contributed to an increase in stump stability, uniform load distribution in the prosthesis socket and a reduction in the percentage of defective stumps. **Conclusions.** Closure of defects with skin and subcutaneous flaps is the method of choice for reconstructing amputation stumps of the lower leg after combat injuries. Fixing muscles to the bone allows you to eliminate stump defects and obtain an elastic muscle stump. The formation of interosseous synostosis using various osteoplastic methods significantly improves the functional properties of the stump and contributes to effective prosthetics.

Keywords: combat injury; amputation stump; reconstructive surgery; myoplasty; osteoplasty

УДК 616.72-002;616.72-007.2;616.72-002.77;616.72-002.78;616.711-002

DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.6.26.2025.1056>Сокрут М.В., Климовицький Ф.В., Сокрут О.П., Потапов Ю.О., Сокрут В.М.,
Литвинова О.В., Попов В.М., Муллахметов А.Г.

Донецький національний медичний університет, м. Кривиницький, Україна

Гомеокінетична класифікація артропатій

Резюме. Актуальність. «Вегетативний паспорт» і коморбідність формують параметри гомеокінезу у пацієнтів з ревматоїдним артритом (РА), визначають механізми пошкодження суглобів через автоімунну агресію (серопозитивний артрит) чи окисний стрес (серонегативний артрит). **Матеріали та методи.** У спостереженні 62 пацієнти були розподілені за «вегетативним паспортом» і коморбідністю на дві групи: перша (38 випадків) — ваготоніки з серопозитивним РА і кальцій-дефіцитною коморбідністю. Друга група (n = 24) — симпатотоніки з серонегативним РА і кальцій-надлишковою коморбідністю. Розподіл на групи ваготоніків і симпатотоніків проводили згідно з даними спектрального аналізу серцевого ритму та автоматизованими тестами визначення «вегетативного паспорта» і форми соматогенії (<https://sokrut.com/somatogenytest2>).

Результати. Проведена клініко-патогенетична паралель суглобового синдрому дозволила виділити дисневротичні, дисгормональні, дизіммунні, дисметаболичні, дисциркуляторні, дизелементозні артропатії та розробити гомеокінетичну/патогенетичну класифікацію на базі вегетативного паспорта, порушення параметрів гомеокінезу і коморбідності. У схему реабілітаційного діагнозу запропоновано включати: «вегетативний паспорт» (ваготонік чи симпатотонік); порушення параметрів гомеокінезу на системному (дисневротичні/дисгормональні/дизіммунні/дисметаболичні артропатії), органному (дисциркуляторні артропатії) та клітинному рівнях (дизелементозні артропатії); форму коморбідності (кальцій-дефіцитна чи кальцій-надлишкова), соматогенії (ацетилхолінові серотонін-дефіцитні тривожно-депресивні чи адренергічні серотонін-надлишкові паніко-фобічні); недостатність функції суглобів (НФ₀₋₄). **Висновки.** Встановлені інформативні критерії визначення вегетативного паспорта, форми коморбідності і соматогенії, індекси рівноваги системи-анти-системи гомеокінезу дали змогу розробити гомеокінетичну класифікацію артропатій та запропонувати індивідуальну програму/план доказового лікування та реабілітації пацієнтів з РА.

Ключові слова: «вегетативний паспорт»; β-адренорецептори; серотонінергічні рецептори 5HT₂-альфа; внутрішньоклітинний кальцій; коморбідність; гомеокінез; ревматоїдний артрит; класифікація

Вступ

На сьогодні актуальною проблемою в медицині є патогенетичні класифікації типових клінічних синдромів: суглобового, артеріальної гіпертензії, кардіального, астматичного, хронічної гіперглікемії та інших, які відображають порушення параметрів гомеокінезу та визначають стратегію і тактику реабілітації [1]. Проведена клініко-патогенетична паралель артропатій, розроблені покрокові алгоритми хірургічної й терапевтичної тактики з урахуванням епідеміології, клініки, стадії та деформації суглобів [2]. На сьогодні запропонована діагностика нейроостеоартропатії Шарко з рідкісною локалізацією СН великого пальця та метод економної стабілізації (K-wire) з ранньою мобілізацією [3]. Визначені критерії діагностики (MPT, температу-

ра/набряк) та ефективність розвантаження (ТСС), які знижують використання хірургічних маніпуляцій при дисгормональних артропатіях [4]. У патогенезі псоріатичного артриту ключову роль відводять імунним порушенням (IL-23/IL-17 та TNF, неоднорідності тканин: шкіра/ентезис/суглоб), що визначає перспективні цілі (IL-17/23, інгібітори JAK/TYK2) [5]. Важливе значення шляху IL-23/IL-17 у розвитку спондиліту, на що вказують консолідовані дані про ключову роль IL-17 у вогнищевому запаленні ентерозитів; клінічні випробування пояснюють відмінності в ефективності блокади IL-17 та IL-23 з осьовим спондилоартритом [6]. Введення стратегії точної медицини на противагу підходу «один розмір для всіх» потребує розгляду ефективності НПЗП, інгібіторів TNF/IL-17/JAK з axSpA та PsA, з ак-

центом на вибір терапії залежно від фенотипу захворювання, форми коморбідності й супутніх проявів (увіг, запальні захворювання кишечника (ЗЗК), шкіра). Сучасний погляд на патогенез ревматоїдного артриту (РА) має на увазі: активацію вродженого/адаптивного імунітету, ключову роль фібробластів, В/Т-клітин та цитокінів (TNF, IL-6, IL-17), внесок генетики та навколишнього середовища. Виділяють серопозитивну і серонегативну форми РА, що потребує визначення мішеней (класифікації), розробки біомаркерів і сфери терапії. Встановлення патогенезу, прогнозування та профілактика змінюють парадигми. «Допорогова» стадія серопозитивного РА, предиктори переходу до клінічного артриту та перші профілактичні випробування утворюють поле профілактичної ревматології [7]. Важлива роль вегетативної дисфункції для визначення не тільки серцево-судинного ризику, але й перебігу різних форм ревматоїдного артриту [1]. Зменшення параметрів варіабельності серцевого ритму пов'язане з CRP та розширенням QTс, що підтверджують дисфункцію ANS та кардіоризик при РА, вказують на порушення симпатовагусного балансу [8, 9]. Неінвазивна стимуляція блукаючого нерва посилює холінергічний протизапальний шлях та поліпшує клінічні дані при РА/ЗЗК [10]. Загострення РА супроводжується підвищенням тону симпатичної нервової системи. Зростає терапевтичний потенціал стимуляції блукаючого нерва при автоімунних захворюваннях, що підтверджує систематичний огляд PRISMA до 19.07.2024, який узагальнює клінічні наслідки VNS, профілів безпеки та прогалини у доказах [11]. «Вегетативний паспорт» визначає форму суглобового синдрому, що потребує подальших досліджень з цих позицій.

Усе частіше звертають увагу на роль мікробіому при РА. Генетична схильність до кишкового дисбактеріозу, ймовірно, передувє артриту та сприяє системному запаленню (молекулярна мімікрія, порушення бар'єра) [12]. Дослідження генетики, осі «кишечник — суглоби», впливу НПЗП/БПЗП, біопрепаратів на мікробіоту визначає перспективи використання FMT/пробіотиків при аксіальному (осьовому) спондиліті, відкриває можливості майбутньої терапії новими лікарськими засобами [13]. Встановлені механізми участі мікробіоти, IL-23/IL-17, роль бар'єра та метаболітів при спондилоартропатіях дозволяють розробляти ад'ювантну мікробну терапію [14, 15]. Порушення кислотно-лужної рівноваги важливе у формуванні дисбактеріозу, який значною мірою залежить від вегетативної дисфункції [16]. Ваготоніки через внутрішньоклітинний алкалоз більше схильні до мікозів, що відкриває нові можливості індивідуальної терапії суглобового синдрому [1]. Сучасне розуміння патогенезу остеоартриту (ОА) та нових підходів до його лікування ґрунтується на ролі епігенетики, порушеннях параметрів гомеокінезу та дизелементозах, формах загибелі клітин (піроптоз/кальціптоз, фероптоз, автоімунна агресія/автофагія), медіаторах болю та нових методиках (CRISPR, scRNA-seq) при дослідженні ОА [17, 18]. Пошкодження суглобів реалізується через механізми автоімунної агресії чи

окисного стресу залежно від вегетативного паспорта пацієнта [1]. Отримано нові дані про мітохондріальний обмін та дисфункцію остеоартриту, які вказують на роль мітохондрій у хондроцитах, показані фенотипи запалення та болю, розроблені напрямки мітохондріально-спрямованої терапії [19]. Старіння та зростаюча роль клітинної сенесценції при остеоартриті лежать в основі SASP, тканиноспецифічної сенесценції (хрящ, субхондральна кістка, синовія), що визначає цілі для сенолітиків/сеноморфіків [20].

Порушення метаболізму часто супроводжується підвищенням сечової кислоти, що потребує балансової терапії алопуринолом/фебуксостатом з метою запобігання загостренню з урахуванням коморбідності [21]. Рекомендації ACR 2020 для лікування подагри розглядають початок призначення алопуринолу (включно із ХЗН) при рівні сечової кислоти < 6 мг/дл, роль колхіцину/НПЗП/ГКП та лікування тофусної подагри [22]. Подагра частіше зустрічається у ваготоніків. Хвороба осадження екстраклітинно кристалів пірофосфату кальцію (CPPD) пов'язана з активацією NLRP3, має різні фенотипи і перебігає на тлі симпатотонії [23]. Запропоновані критерії класифікації ACR/EULAR 2023 для захворювання осадження пірофосфату кальцію, які включають вагові клінічні шкали/X-гау/дослідження синовіальної рідини [24]. Перспективним є метод встановлення «вегетативного паспорта» для визначення форми дисметаболическої артропатії, що повинно знайти відображення в гомеокінетичній класифікації суглобового синдрому.

Синдромальний патогенетичний підхід є базовим у медичній реабілітації [1]. Патогенез основного і супутнього захворювання об'єднує коморбідність (єдиний патогенез), критерієм якої є рівень внутрішньоклітинного кальцію як універсального месенджера [25]. Важливу роль у патології відводять порушенням роботи кальцієвих, натрій-калієвих, хлоридних, водних каналів [26]. Виділяють кальцій-дефіцитну коморбідність на тлі остеопорозу і кальцій-надлишкову при атеросклерозі [1, 25], що актуально у зв'язку з механізмом кальціптозу — «кальцієвої смерті клітин» [27] та обґрунтовує використання блокаторів кальцієвих каналів при артропатіях [28].

На сьогодні більше використовують класифікації на базі структурного (морфологічного), функціонального та клінічного порушення опорно-рухової системи [1]. Ключовим параметром здоров'я та хвороби є гомеокінез, який представлений багаторівневими структурами в організмі [1]. Гомеокінез — це динамічна взаємодія всіх регуляторних систем організму, яка забезпечує збереження життєдіяльності, адаптацію до змін умов зовнішнього і внутрішнього середовища. Порушення параметрів гомеокінезу значною мірою детерміновані генотипом, «вегетативним паспортом» хворого (щільністю адренорецепторів у тканинах) і фенотиповими стресовими (адаптаційними) реакціями (рис. 1, 2). «Вегетативний паспорт» пацієнта визначають за сенситивністю рецепторів тромбоцитів до ацетилхоліну і норадреналіну [1, 2]. Інформативними і валідними

виявились тести Сокрута з визначення «вегетативного паспорта» і форми соматогенії, які знайшли широке клінічне застосування. Актуальним є вивчення внутрішньоклітинних сигнальних шляхів і міжклітинної взаємодії в хондроцитах і синовіях. Вегетогомеокінетична теорія патології стала загальноприйнятною, що дозволило запропонувати гомеокінетичну класифікацію артропатій та надати їй для обговорення.

Чинні класифікації вирішують окремі проблеми, але базово не пов'язані між собою (не мають єдиної патогенетичної основи). Гомеокінетична класифікація артропатій дозволить індивідуалізувати лікувальні та реабілітаційні програми [1]. Нозологічні стандарти лікування потрібно трансформувати у синдромальні рекомендації з урахуванням форми захворювання і коморбідності. Ваготонічні чи симпатотонічні параметри гомеокінезу формують відповідно кальцій-дефіцитну (остеопороз) чи кальцій-надлишкову (атеросклероз) коморбідність, яку визначають за рівнем внутрішньоклітинного кальцію у волоссі [25]. Пошкодження у суглобах при ревматоїдному артриті реалізуються через механізми автоімунної агресії чи окисного стресу залежно від його форми [1, 29]. Тип соматогенії узгоджується з вегетативним паспортом та коморбідністю, які формують порушення параметрів гомеокінезу [25]. У симпатотоніків при кальцій-надлишковій коморбідності відслідковують адренергічні серотонін-надлишкові реакції з активацією перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), що запускає окисне пошкодження тканин, зокрема через фероптоз, при остеоартриті і дозволяє запропонувати нові терапевтичні стратегії — потенційні антифероптотичні підходи [29]. Корекція рівня внутрішньоклітинного кальцію при симпатотонії з кальцій-надлишковою коморбідністю спрямована на усунення кальціптозу [27, 28]. При домінуючій ваготонії і кальцій-дефіцитній коморбідності спостерігають ацетилхолінові серотонін-дефіцитні стани, що лежать в основі автоімунної агресії [1, 25]. Запропонований варіант гомеокінетичної класифікації артропатій дозволяє враховувати основні клінічні та патогенетичні аспекти суглобового синдрому.

Матеріали та методи

Робота виконана на 62 хворих на РА віком від 40 до 60 років. Хворі були поділені на дві групи згідно з клініко-лабораторними даними (серопозитивний/серонегативний), спектральним аналізом серцевого ритму (САСР) та автоматизованим визначенням параметрів гомеокінезу і «вегетативного паспорту» [1, 9]. Першу групу становили 38 ваготоніків з серопозитивним РА, а другу — 24 симпатотоніки з серонегативною формою РА. Показники норми вивчалися у групі здорових осіб — у 40 практично здорових людей цієї вікової категорії, серед яких було 11 чоловіків і 29 жінок. Тривалість захворювання становила $10,00 \pm 0,56$ року. У групу ваготоніків включали серопозитивний варіант РА за ревматоїдним фактором (RF) і антитілами до циклічного цитрулінового пептиду (АССР) на тлі гіперчутливості імунної системи, кальцій-дефіцитної коморбідності

(остеопорозу) та домінування ваготонії [1, 25]. Остеопороз підтверджували результатами двоенергетичної рентгенівської остеоденситометрії проксимального відділу стегнової кістки (QDR-4500-Delphi-Hologic, США). У групу симпатотоніків відносили пацієнтів з серонегативним РА, високою активністю ПОЛ, симпатотонією, гіперкатехолемією. Оцінку вегетативного тону здійснювали методом спектрального аналізу за допомогою комп'ютерного електрокардіографа ANS-Pro та «Кардіолаб-2000» (Україна). Спектральний аналіз п'ятихвилинних послідовностей RR-інтервалів електрокардіограм проводили за допомогою методу швидкого перетворення Фур'є [1]. На ритмокардіограмах визначали потужність LF (Low Frequency — зона низьких частот (0,05–0,15 Гц)) і HF (High Frequency — зона високих частот (0,15–0,5 Гц)), а також індекс симпатовагусної рівноваги (ICBP = LF/HF). Потужність високочастотного інтервалу (HF) зв'язана з коливаннями вагусного тону при диханні та визначає активність парасимпатичної ВНС, а низькочастотний (LF) змінюється за рахунок механізмів регуляції судинного тону і відображає стан симпатичної ланки ВНС. «Вегетативний паспорт» і «вегетативний тонус» відображали відповідно стан структури і функцію, яка була більш варіабельною. Загострення РА викликало додаткову активацію симпатичної системи, що потрібно враховувати в оцінці вегетативних порушень. Більш стійким і вірогідним виявився «вегетативний паспорт», заснований на структурних змінах параметрів гомеокінезу. Форма соматогенії значною мірою залежала від «вегетативного паспорту» і серотонінової недостатності (ацетилхолінова, серотонін-дефіцитна тривожно-депресивна чи адренергічна серотонін-надлишкова панико-фобічна) [1], що підтверджували за допомогою тестів Сокрута, Бека, Спілбергера, Люшера та опитувальника SF-36. Для визначення форми коморбідності досліджували рівень Са у крові і волоссі. Використовували атомно-абсорбційний спектрометр SolAAr-Mk2-MOZe з електрографітовим атомізатором (Великобританія). Рівень внутрішньоклітинного кальцію, який визначається методом спектрального аналізу волосся (МAB-діагностика — мультиелементний аналіз волосся) і співвіднесений зі значеннями норми, виступає «точкою відліку» в діагностиці типу коморбідності [25]. Форму коморбідності визначали за індексом нормованого внутрішньоклітинного кальцію ($ICa_{\text{норм}}$), підраховували за формулою: $ICa_{\text{норм}} = Ca \text{ у волоссі хворого} / Ca \text{ у нормі}$ ($ICa_{\text{норм}} = 1,0$ — здорові; $ICa_{\text{норм}} > 1,0$ вказував на Са-надлишкову коморбідність; $ICa_{\text{норм}} < 1,0$ вказує на закиснене середовище з активацією кислих фосфатаз, схильністю до атеросклерозу при кальцій-надлишковій коморбідності, високому кальцій-коронарному індексу; значення ІКЛР 1,0 відображало механізми пошкодження суглобів через оксидантний стрес [1]. Визначали індекси рівноваги системи-анти-системи порушення параметрів гомеокінезу [1]. Статистична обробка отриманих результатів дослідження проведена за допомогою варіаційного, непараметричного, кореляційного, регресивного, одно- (ANOVA) і

багатофакторного (ANOVA/MANOVA) дисперсійного аналізу (програми Microsoft Excel і Statistica-Stat-Soft, США). Оцінювали середнє значення (M), його стандартну похибку (m) і відхилення (SD), параметричні коефіцієнти кореляції Пірсона і непараметричні Кендалла, критерії регресії, дисперсії Брауна — Форсайта, Уїлкоксона — Рао, Макнемара — Фішера, Стюдента і вірогідність статистичних показників. У таблицях подані результати власного дослідження, для кожного показника наводиться середнє значення, його похибка (M, m), вірогідність зміни визначених показників за критерієм Стюдента, кореляційна залежність з урахуванням коефіцієнтів кореляції і детермінації.

Результати та обговорення

Проведене дослідження дозволило визначити інформативні показники «вегетативного паспорта» пацієнта, ваготонічний та симпатотонічний гомеокінез, форму суглобового синдрому і коморбідності. Ваготонікостайери (основний медіатор — ацетилхолін) схильні до кальцій-дефіцитної коморбідності (остеопорозу), ацетилхолінових, серотонін-дефіцитних тривожно-депресивних соматогеній, домінування анаболічних гормонів, алергії, алкалозу. Формується серопозитивний РА, пошкодження у суглобах реалізуються через механізми автоімунної агресії [1]. Симпатотоніки-спринтери (основний медіатор — норадреналін) схильні до кальцій-надлишкової коморбідності, адренергічних, серотонін-надлишкових паніко-фобічних соматогеній, домінування катаболічних гормонів, ацидозу та імунодефіцитних станів, що підтверджують результати САСР, психологічне тестування та індекси рівноваги параметрів гомеокінезу. Розвивається серонегативний

РА, причиною якого є оксидантний стрес, а форми загибелі клітин — піроптоз/кальціптоз, фероптоз [17, 27]. Різні форми РА потребують індивідуалізації в лікуванні та реабілітації. Результати варіаційної пульсометрії, потужність спектрів серцевого ритму в діапазонах LF і HF, а також їх співвідношення LF/HF (індекс симпатовагусної рівноваги) підтверджували значну роль «вегетативного паспорта»/вегетативної дисфункції в патогенезі суглобового синдрому (табл. 1). Ці показники дозволили попередньо провести розподіл пацієнтів на групи: перша — ваготоніки з серопозитивним РА, друга — симпатотоніки з серонегативним РА, і розподілити пацієнтів згідно з клініко-лабораторно-інструментальним аналізом. У контрольній групі (норма) потужність LF = 786,2 ± 20,5, HF = 489,1 ± 12,4, співвідношення LF/HF = 1,59 ± 0,05 (табл. 1).

Індекс симпатовагусної рівноваги в контрольній групі — 1,60 ± 0,05. Його значення > 1,65 вказували на домінування симпатотонії, а < 1,55 відображали ваготонію. Отримані результати індексу LF/HF довели доцільність його використання як діагностичного критерію визначення «вегетативного паспорта» і форми РА. Отримані закономірності і тісні кореляції параметрів різних форм РА з вегетативним паспортом підтверджували авторську «вегетогомеокінетичну теорію патології», яка відображала еволюцію концепції стресу, формування дизадаптації [1, 9, 25]. Форми коморбідності уточнювали «вегетативний паспорт» пацієнта (табл. 2).

У ваготоніків, хворих на РА, визначалась кальцій-дефіцитна, у симпатотоніків, хворих на РА, — кальцій-надлишкова коморбідність, що пов'язують з властивостями норадреналіну й адреналіну підвищувати рівень внутрішньоклітинного кальцію. Більш інформативними виявились показники кальцію у волосі, які можуть

Таблиця 1. Показники спектрального аналізу ритму серця в пацієнтах з різними формами артритів (M ± m)

Групи	Показники		
	LF	HF	LF/HF
Група здорових людей (n = 40)	786,2 ± 20,5	489,1 ± 12,4	1,59 ± 0,05
Група 1, ваготоніки з серопозитивними артритами (n = 38)	370,8 ± 9,0*	384,7 ± 13,0*	0,91 ± 0,04*
Група 2, симпатотоніки з серонегативними артритами (n = 24)	594,5 ± 12,5*	318,5 ± 13,9*	2,01 ± 0,09*

Примітка: * — p < 0,05, вірогідна різниця показників порівняно з контрольною групою.

Таблиця 2. Розподіл хворих на РА за показниками індексу Барнетта — Нордіна (BNI), індексу мінеральної щільності кістки (BMD) та вмісту кальцію в крові і волосі (M ± SE)

Ознаки	Контрольна група (n = 40)	Групи хворих на РА	
		Група 1, ваготоніки, Са-дефіцитна коморбідність (n = 38), IСа _{норм} < 1,0	Група 2, симпатотоніки, Са-надлишкова коморбідність (n = 24), IСа _{норм} > 1,0
BNI, в.о.	0,42 ± 0,51	0,400 ± 0,013	0,430 ± 0,083
BMD, –SD	2,00 ± 0,60	0,920 ± 0,091	1,90 ± 0,14
Са у крові, мг/л	99,40 ± 3,71	65,7 ± 2,1	57,5 ± 1,6
Са у волосі, мкг/г	302,30 ± 19,21	247,90 ± 27,41*	363,6 ± 22,6*

Примітка: * — p < 0,05, вірогідна різниця показників порівняно з контрольною групою.

бути використані для визначення «вегетативного паспорту» і патогенетичної форми суглобового синдрому та соматогенії. Хворих на РА з Са-дефіцитною коморбідністю виявлено 38 (73 %), з Са-надлишковою — 24 (47 %). Форма коморбідності визначала векторність порушення параметрів гомеокінезу й вказувала на механізми пошкодження через автоімунну агресію при серопозитивному РА [1] та окисний стрес при серонегативному РА [17, 25]. Індекси рівноваги системи-антисистеми параметрів гомеокінезу при РА підтверджували отримані закономірності. Домінуюча ваготонія корелює з кальцій-дефіцитною коморбідністю, активацією лужних фосфатаз та проявами остеопорозу [1, 25]. Симпатотонія асоціюється з кальцій-надлишковою коморбідністю, високим кальцій-коронарним індексом (коронарний синдром), активацією ПОЛ і кислих фосфатаз, атеросклерозом і наявністю кальцинатів у тканинах [1, 27]. Суглобовий синдром часто перебігає на тлі соматогенії, які пов'язують з порушенням рівноваги медіаторів ацетилхоліну/норадреналіну («вегетативний паспорт»), біологічно активних речовин (серотоніну/гістаміну), дизелементозом [25]. Отримані результати дослідження та тестування пацієнтів послужили базою для гомеокінетичної класифікації суглобового синдрому:

I. За етіологічними ознаками:

1.1. Первинні генотипові артропатії.

1.2. Вторинні фенотипові артропатії: екзогенні (біологічні, інфекційні, вірусні, мікозні, хімічні, фізичні)/ендогенні інтоксикації.

II. Залежно від порушень на системному рівні регуляції гомеокінезу:

2.1. Дисневротична артропатія (артропатія на тлі психо- і соматогенії):

А. Ваготонічна артропатія на тлі серотонін-дефіцитних, тривожно-депресивних соматогеній (больові артропатії при депресії; синдром гіпермобільності суглобів — синдром Елерса — Данло).

Б. Симпатотонічна артропатія на тлі серотонін-надлишкових маніакально-паніко-фобічних реакцій (больові артропатії при фобіях, маніакально-паніко-фобічних соматогеніях).

2.2. Дисгормональна артропатія:

А. Артропатія гормоно-анаболічна (менопаузальна з абсолютною естрогеновою недостатністю; на тлі ваготонічного (інсулінотолерантного) синдрому хронічної гіперглікемії; гіперпаратиреоїдна; при акромегалії; пролактинова, мікседематозна (гіпотиреоїдна) артропатія).

Б. Артропатія гормоно-катаболічна, (менопаузальна з відносною естрогеновою недостатністю; тиреотоксична (гіпертиреоїдна); гіперкальцитонінова; на тлі симпатотонічного (інсулінодефіцитного) СХГ).

2.3. Дизіммунна (ревматична) артропатія:

А. Алергічна/серопозитивна артропатія (серопозитивний ревматоїдний артрит, синдром Фелті; псоріатичний артрит (зимово-осіння форма); спондилоартрит (хвороба Бехтерева); суглобовий синдром при хворобі Крона/неспецифічному аортоартеріїті; неспе-

цифічному виразковому коліті; склеродермії, дерматомиозиті; системних васкулітах).

Б. Імунодефіцитна/імунодепресивна, серонегативна артропатія (серонегативний ревматоїдний артрит, псоріатичний артрит (весняно-літня форма); саркоїдозна артропатія (саркоїдоз); дисемінована імунодефіцитна артропатія; на тлі окисного стресу).

2.4. Дисметаболична (кристалічна) артропатія:

А. Алкалозна, кальцій-дефіцитна (остеопороз), мікозна артропатія (остеопороз; подагра первинна; подагра вторинна).

Б. Ацидозна, кальцій-надлишкова (атеросклероз) артропатія (хондрокальциноз, псевдоподагра, гідроксипатитний і пірофосфатний артрити; амліодозна артропатія).

III. Органний рівень гомеокінезу: артропатії з відповідними синдромами органної недостатності та порушеннями кровотоку:

3.1. Дисциркуляторні артропатії — через порушення кровообігу і мікроциркуляції:

А. Артеріальні ішемічні артропатії — артеріальна недостатність (асептичний некроз головки тазостегнової кістки).

Б. Венозні, застійні, гіпоксичні артропатії — венозна недостатність (варикозна венозна артропатія; синовіома).

Суглобовий синдром є типовим клінічним синдромом і зустрічається або як самостійне захворювання, або є коморбідним станом при патології внутрішніх органів.

3.2. Суглобовий синдром при органічній недостатності (артропатія при хронічному гепатиті; силікозна артропатія (хвороба Коліне — Каплана); артрози при гемофілії тощо).

3.3. Диспластичні артропатії:

А. Гіперпластична артропатія (синдром Марфана).

Б. Гіпопластична артропатія (хондроматоз суглобів).

В. Неопластична артропатія (мієломна хвороба; лейкозний артрит; злоякісні пухлини суглобів).

Недостатність функції органів (НФ_{0-4}) дозволяє виявити ступінь адаптації (субкомпенсація (адаптаційний синдром); декомпенсація (дизадаптаційний синдром)).

IV. Клітинний рівень гомеокінезу: артропатії на тлі дизелементозів:

4.1. Дизелементозні артропатії:

А. Ваготонічні дизелементозні артропатії — дефіцит Ca, Fe, Si, I, Zn, Cr, Li, Co і надлишок K, Mg, Na, V, Mo, Ni, Mn, Cu, Se (остеопороз).

Б. Симпатотонічні дизелементозні артропатії — надлишок Ca, Fe, Si, I, Zn, Cr, Li, Co і дефіцит K, Mg, Na, V, Mo, Ni, Mn, Cu, Se (уровська хвороба, гемохроматозна артропатія, синдром Форестьє).

За клінічним перебігом:

1. Інтермітуючий, персистуючий легкий перебіг артропатії.

2. Помірно персистуюча середньої тяжкості артропатія.

3. Тяжка персистуюча форма артропатії.

За ступенем адаптації та функціональної недостатності опорно-рухової системи: 1) ΦH_0 ; 2) ΦH_1 (порушення функції не більше ніж 25 %); 3) ΦH_2 (субадаптація, від 25 до 50 %); 4) ΦH_3 (дизадаптація або слабка компенсація, від 51 до 75 %); 5) ΦH_4 (повна дизадаптація, понад 75 %). Для оцінки стану функції в експертизі і реабілітації враховуються два критерії — ступінь порушення функції і можливості її компенсації за допомогою медико-технічних засобів. Якщо компенсація поліпшує стан функції, то функціональний клас оцінюється з урахуванням ефекту компенсації.

Класифікація суглобового синдрому — поняття динамічне, що відображає досягнення фундаментальної і прикладної медицини, у якій наводиться номенклатура захворювань/синдромів на основі гомеокінезу, сутності патологічних процесів і ступеня їх близькості між собою (коморбідність — єдиний патогенез). Перебіг захворювання: гострий, підгострий, хронічний, рецидивуючий.

Запропонована авторська гомеокінетична/патогенетична класифікація артропатій дозволяє проводити клініко-патогенетичну паралель, обґрунтоване/доказове, диференційоване етіо- та патогенетичне лікування суглобового синдрому за індивідуальними реабілітаційними програмами і є своєрідним «ключем» медичної реабілітації. Запропонована вегетогомеокінетична теорія патології суглобів. Передусім важливо, що суглобова патологія у більшості випадків за своєю суттю є запальним процесом (синовітом). Встановлено, що задіяно два універсальні механізми пошкодження суглобів: через автоімунну агресію у ваготоніків та окисний стрес — у симпатотоніків. Іншими словами, значною мірою форму суглобового синдрому визначає «вегетативний паспорт» пацієнта, параметри гомеокінезу і коморбідність. У схему реабілітаційного діагнозу запропоновано включати: «вегетативний паспорт» (ваготонік чи симпатотонік); порушення параметрів гомеокінезу на системному (дисневротичні/дисгормональні/дизіммунні/дисметаболичні артропатії), органному (дисциркуляторні артропатії) та клітинному рівнях (дизелементозні артропатії); форму коморбідності (кальцій-дефіцитна чи кальцій-надлишкова); соматогенії (ацетилхолінові серотонін-дефіцитні тривожно-депресивні чи адренергічні серотонін-надлишкові паніко-фобічні); недостатність функції суглобів (ΦH_{0-4}).

Висновки

1. У патогенезі суглобового синдрому (артропатії) важливу роль відіграє вегетативний паспорт (щільність адрено- та серотонінергічних рецепторів $H5TR2$ -альфа, чутливість рецепторів тромбоцитів до ацетилхоліну і норадреналіну), порушення параметрів гомеокінезу (індекси рівноваги системи-антисистеми) та коморбідність (за рівнем внутрішньоклітинного кальцію). Ваготонічний трофотропний, кальцій-, цинк-, хром-, серотонін-дефіцитний, натрій-, магній-, гістамін-залежний гомеокінез, кальцій-дефіцитна коморбідність формують патогенез серопозитивного РА з ацетилхолі-

новою серотонін-дефіцитною тривожно-депресивною соматогенією через автоімунне пошкодження суглобів. Симпатотонічний ерготропний, натрій-, магній-, гістамін-дефіцитний і кальцій- та серотонін-надлишковий гомеокінез, кальцій-надлишкова коморбідність лежать в основі серонегативного РА з окисантним пошкодженням суглобів.

2. Проведена клініко-патогенетична паралель суглобового синдрому дозволила виділити дисневротичні, дисгормональні, дизіммунні, дисметаболичні, дисциркуляторні, дизелементозні артропатії та розробити гомеокінетичну/патогенетичну класифікацію на базі «вегетативного паспорта», порушення параметрів гомеокінезу і коморбідності.

3. У схему реабілітаційного діагнозу запропоновано включати: «вегетативний паспорт» (ваготонік чи симпатотонік); порушення параметрів гомеокінезу на системному (дисневротичні/дисгормональні/дизіммунні/дисметаболичні артропатії), органному (дисциркуляторні артропатії) та клітинному рівнях (дизелементозні артропатії); форму коморбідності (кальцій-дефіцитна чи кальцій-надлишкова), соматогенії (ацетилхолінова серотонін-дефіцитна тривожно-депресивна чи адренергічна серотонін-надлишкова паніко-фобічна); недостатність функції суглобів (ΦH_{0-4}).

4. Встановлені інформативні критерії визначення «вегетативного паспорта», форми коморбідності і соматогенії, індекси рівноваги системи-антисистеми гомеокінезу надали можливість розробити гомеокінетичну класифікацію артропатій та запропонувати індивідуальну програму/план доказового лікування й реабілітації пацієнтів з РА.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Внесок авторів. Сокрут М.В. — концептуалізація, методологія, література, робота з AI; Климовицький Ф.В. — перевірка, написання, рецензування та редагування; Потапов Ю.О. — дослідження, клінічний аналіз, курація даних; Сокрут О.П. — написання, рецензування та редагування, адміністрування проєкту; Сокрут В.М. — дослідження, формальний аналіз, візуалізація, курація даних; Литвинова О.В. — ведення, написання, початковий проєкт; Попов В.М. — програмне забезпечення, формальний і клінічний аналіз; Муллахметов А.Г. — програмне забезпечення, формальний аналіз.

Список літератури

1. Сокрут М.В., Гоженко А.І., Климовицький Ф.В., Сокрут В.М., Сокрут О.П., Попов В.М. та ін. Порушення параметрів гомеокінезу при патології суглобів та їх ендотропезуванні. Львів: Магнолія, 2006; 2024. 310 с.
2. Argyropoulos M, Wynell-Mayow W, Johnson O, Faroug R, Johal KS, Deol RS, et al. Charcot neuro-osteoarthropathy: a review of key concepts and an evidence-based surgical management algorithm. *Front Clin Diabetes Healthc.* 2024;5:1344359. doi: 10.3389/fcdhc.2024.1344359.

3. Moonot P, Pawar P. Approach to Charcot Neuroarthropathy of the Great Toe: A Case Report. *Cureus*. 2024;16(8):e71368. doi: 10.7759/cureus.71368.
4. Raspovic KM, et al. Diagnosis and treatment of active Charcot neuro-osteopathy in persons with diabetes mellitus: a systematic review. *Diabetes Metab Res Rev*. 2024;40(3):e3653. doi: 10.1002/dmrr.3653.
5. Azuaga AB, Ramirez J, Cañete JD. Psoriatic Arthritis: Pathogenesis and Targeted Therapies. *Int J Mol Sci*. 2023;24(5):4901. doi: 10.3390/ijms24054901.
6. Alivernini S, MacDonald L, Elmesmari A, Kurowska-Stolarska M, McInnes IB. The pathogenesis of rheumatoid arthritis: lessons from human in vitro models. *Immunity*. 2022;55(12):2255-2270. doi: 10.1016/j.immuni.2022.11.009.
7. Deane KD, Holers VM. Rheumatoid Arthritis Pathogenesis, Prediction, and Prevention: An Emerging Paradigm Shift. *Arthritis Rheumatol*. 2021;73(2):181-193. doi: 10.1002/art.41417.
8. Saramet EE, Pomirleanu C, Maștaleru A, et al. Autonomic Dysfunction and Cardiovascular Risk in Patients with Rheumatoid Arthritis: Can Heart Rate Variability Analysis Contribute to a Better Evaluation of the Cardiovascular Profile of a Patient? *J Clin Med*. 2023;12(24):7736. doi: 10.3390/jcm12247736.
9. Сокрут В.М. Клінічний тест визначення форми соматогенії. Available from: <https://sokrut.com/somatogenytest2>.
10. Liu F-J, Wu J, Gong L-J, Yang H-S, Chen H. Non-invasive vagus nerve stimulation in anti-inflammatory therapy: mechanistic insights and future perspectives. *Front Neurosci*. 2024;18:1490300. doi: 10.3389/fnins.2024.1490300.
11. Chan E, Mani AR. Assessing the therapeutic potential of vagus nerve stimulation in autoimmune diseases: a systematic review. *Physiol Rep*. 2025;13(3):e70230. doi: 10.14814/phy2.70230.
12. Tseiseri M-N, Silman AJ, Keene DJ, Dakin SG. The role of the microbiome in rheumatoid arthritis: a review. *Rheumatol Adv Pract*. 2023;7(2):rkad034. doi: 10.1093/rap/rkad034.
13. Tsukazaki H, Kaito T. The Role of the IL-23/IL-17 Pathway in the Pathogenesis of Spondyloarthritis. *Int J Mol Sci*. 2020;21(17):6401. doi: 10.3390/ijms21176401.
14. Proft F, Duran TI, Ghoreschi K, et al. Treatment strategies for Spondyloarthritis: Implementation of precision medicine — Or “one size fits all” concept? *Autoimmun Rev*. 2024;23(10):103638. doi: 10.1016/j.autrev.2024.103638.
15. Yemula N, Sheikh R. Gut microbiota in axial spondyloarthritis: genetics, medications and future treatments. *ARP Rheumatology*. 2024;3:216-225. doi: 10.63032/WUII1201.
16. Lyu X, et al. Emerging story of gut dysbiosis in spondyloarthritis. *Front Cell Infect Microbiol*. 2022;12:973563. doi: 10.3389/fcimb.2022.973563.
17. Tong L, Yu H, Huang X, et al. Current understanding of osteoarthritis pathogenesis and relevant new approaches. *Bone Res*. 2022;10(1):60. doi: 10.1038/s41413-022-00226-9.
18. Han S. Osteoarthritis year in review 2022: biology. *Osteoarthritis Cartilage*. 2022;30(12):1575-1582. doi: 10.1016/j.joca.2022.09.003.
19. Guo P, Alhaskawi A, Mokbel SAA, Pan Z. Recent development of mitochondrial metabolism and dysfunction in osteoarthritis. *Front Pharmacol*. 2025;16:1538662. doi: 10.3389/fphar.2025.1538662.
20. Diekman BO, et al. Aging and the emerging role of cellular senescence in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2024;32(6):773-787. doi: 10.1016/j.joca.2024.02.008.
21. FitzGerald JD, Dalbeth N, Mikuls T, et al. 2020 American College of Rheumatology Guideline for the Management of Gout. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2020;72(6):744-760. doi: 10.1002/acr.24180.
22. Mikuls TR. Gout. *N Engl J Med*. 2022;387(20):1877-1887. doi: 10.1056/NEJMc2203385.
23. Pascart T, et al. Calcium pyrophosphate deposition disease. *Lancet Rheumatol*. 2024;6(11):e791-e804. doi: 10.1016/S2665-9913(24)00122-X.
24. Abhishek A, Tedeschi SK, Pascart T, Latourte A, et al. The 2023 ACR/EULAR Classification Criteria for Calcium Pyrophosphate Deposition Disease. *Ann Rheum Dis*. 2023;82(10):1248-1257. doi: 10.1136/ard-2023-224575.
25. Сокрут М.В. Елементоз при патології суглобів та ендокринології. Слов'янськ: Друкарський двір, 2021. 218 с.
26. Mai K, Maverakis E, Li J, Zhao M. Maintaining and restoring gradients of ions in the epidermis: the role of ion and water channels in acute cutaneous wound healing. *Adv Wound Care (New Rochelle)*. 2023;12(12):696-709. doi: 10.1089/wound.2022.0128.
27. Du Y, Qi X, Zhang L, Yang Y, Chen T. Calcium influx-induced lytic cell death disrupts skin immune homeostasis. *Cell Discov*. 2023;9:124. doi: 10.1038/s41421-023-00623-2.
28. Cisco LA, Sipple MT, Edwards KM, Thornton CA, Lueck JD. Verapamil mitigates chloride and calcium bi-channelopathy in a myotonic dystrophy mouse model. *J Clin Invest*. 2024;134(1):e173576. doi: 10.1172/JCI173576.
29. Zhang Y, et al. Ferroptosis in Osteoarthritis: Towards Novel Therapeutic Strategies. *Int J Mol Sci*. 2024;25(21):11474. doi: 10.3390/ijms252111474.

Отримано/Received 10.09.2025

Рецензовано/Revised 17.10.2025

Прийнято до друку/Accepted 01.11.2025

Information about authors

M.V. Sokrut, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: nikolaisokrut@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-5702-1406>
 F.V. Klymovytskyi, MD, DSc, PhD, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: klimovitskiyfedor@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0566-5808>
 O.P. Sokrut, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: sokrutolga@gmail.com
 Yu.O. Potapov, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
 V.M. Sokrut, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: v.m.sokrut@dnmu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1430-1758>
 O.V. Lytvynova, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: lencha77@me.com; <https://orcid.org/0009-0000-3601-5624>
 V.M. Popov, Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
 A.G. Mullakhmetov, Medical Center "Drive Medicine", Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: noastma@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-4101-6023>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. M.V. Sokrut — conceptualization, methodology, literature, work with AI; F.V. Klymovytskyi — proofreading, reviewing and editing; Yu.O. Potapov — research, clinical analysis, data curation; O.P. Sokrut — writing, reviewing and editing, project administration; V.M. Sokrut — research, formal analysis, visualization, data curation, O.V. Lytvynova — management, writing, initial project; V.M. Popov — software, formal and clinical analysis; A.G. Mullakhmetov — software, formal analysis.

M.V. Sokrut¹, F.V. Klymovytskyi¹, O.P. Sokrut¹, Yu.O. Potapov¹, V.M. Sokrut¹, O.V. Lytvynova¹, V.M. Popov¹, A.G. Mullakhmetov²

¹Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Medical Center "Drive Medical", Kropyvnytskyi, Ukraine

Homeokinetic classification of arthropathies

Abstract. Background. The “autonomic passport” and comorbidity form homeokinesis parameters in patients with rheumatoid arthritis (RA), determine the mechanisms of joint damage due to autoimmune aggression (seropositive arthritis) or oxidative stress (seronegative arthritis). **Materials and methods.** Our study involved 62 patients who were divided into two groups according to the “autonomic passport” and comorbidity: group 1 (38 cases) — vagotonics with seropositive RA and calcium-deficient comorbidity; group 2 (n = 24) — sympathotonics with seronegative RA and calcium-excessive comorbidity. The division into groups of vagotonics and sympathotonics was carried out according to the data of spectral analysis of the heart rate and automated tests for determining the “autonomic passport” and the form of somatogeny [<https://sokrut.com/somatogenytest2>]. **Results.** The conducted clinical and pathogenetic comparison of the joint syndrome allowed distinguishing dysneurotic, dyshormonal, dysimmune, dysmetabolic, dyscirculatory, dyselement arthropathies and develop a homeokinetic/pathogenetic classification based on the “autonomic passport”, violations of homeokinesis parameters and comorbidity. It is pro-

posed to include in the rehabilitation diagnosis scheme the following: “autonomic passport” (vagotonic or sympathotonic); violation of homeokinesis parameters at the systemic (dysneurotic/dyshormonal/dysimmune/dysmetabolic arthropathies), organ (dyscirculatory arthropathies) and cellular levels (dyselemental arthropathies); form of comorbidity (calcium-deficient or calcium-excessive), somatogeny (acetylcholine serotonin-deficient anxious-depressive or adrenergic serotonin-excessive panic-phobic); insufficiency of joint function. **Conclusions.** The established informative criteria for determining the “autonomic passport”, forms of comorbidity and somatogeny, indices of the balance of the homeokinesis system-antisystem made it possible to develop a homeokinetic classification of arthropathies and propose an individual program/plan of evidence-based treatment and rehabilitation of RA patients.

Keywords: “autonomic passport”; β -adrenoreceptors; 5-HT_{2A} serotonergic receptors; intracellular calcium; comorbidity; homeokinesis; rheumatoid arthritis; classification

Бондаренко Д.В., Безсмертний Ю.О., Шевчук В.І.

Університетська клініка Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова,
м. Вінниця, Україна

Ремоделювання кукси кістки під впливом механічного навантаження

Резюме. Актуальність. Незважаючи на давність операцій з ампутації, до цього часу недостатньо висвітлені питання ремоделювання кісткової тканини кукси і фактори, що на них впливають. **Мета:** дослідити особливості ремоделювання кукси кістки та можливості його оптимізації в умовах герметичного закриття кістковомозкової порожнини та механічного навантаження. **Матеріали та методи.** Проведено чотири серії дослідів на 36 кроликах з ампутацією стегна в середній третині. У I серії під опилом кістки зшивали м'язи-антагоністи. У II, крім міопластики, проводили механічне циклічне навантаження кукси ударною хвилею з енергією 0,5 мДж/мм², частотою 2 Гц з подачею 400 імпульсів за сеанс. У III серії опил герметично закривали губчастим трансплантатом. У IV серії, крім закриття опилу трансплантатом, проводили механічне циклічне навантаження кукси аналогічно з другою серією через 4, 8, 16 тижнів після ампутації. Терміни спостереження — 6, 10, 18 тижнів. Метод дослідження гістологічний. **Результати.** У I серії в значній кількості дослідів відмічалось патологічне ремоделювання кісткової тканини з розвитком атрофії, порушення форми кінця кукси, її викривлення, стресові переломи, остеопороз. У II серії результати були аналогічними. У III серії в найближчі терміни (6 тижнів) ремоделювання відбувалося як фізіологічне, а у віддалені (18 тижнів) — розвивались поширені дегенеративно-дистрофічні процеси. У IV серії в усі терміни спостерігалось ремоделювання, наближене до фізіологічного. **Висновки.** Початок механічного навантаження через 4 тижні після міопластичної ампутації викликає поглиблення дегенеративно-дистрофічних і некротичних процесів та призводить до патологічного ремоделювання кісткової тканини, розвитку остеопорозу та стресових переломів. За відсутності механічного навантаження герметичне закриття кістковомозкової порожнини дозволяє отримати органотипову циліндричну форму кукси вже в термін 6 тижнів після ампутації, що можна розцінити як фізіологічне ремоделювання. У віддалені терміни (10–18 тижнів після ампутації) відсутність механічного навантаження призводить до порушень ремоделювання з розвитком остеопорозу. Герметичне закриття кістковомозкової порожнини з механічним навантаженням кукси дозволяє отримати її органотипову форму з повною завершеністю ремоделювання.

Ключові слова: ремоделювання кістки кукси; герметичне і негерметичне закриття кістковомозкового каналу; механічне навантаження

Вступ

Ампутація кінцівки — реконструктивне хірургічне втручання, спрямоване на максимально можливу компенсацію втраченого сегмента кінцівки [1, 2]. Особливе значення в майбутньому функціонуванні кукси відіграє її кістковий залишок. В ідеалі це мінералізований структурний каркас, якому належить виконувати функцію опори і руху, підтримки та захисту м'яких тканин, максимального збереження мі-

нералів [3]. Протягом життєвого циклу кука кістки знаходиться в процесі регенерації і постійного ремоделювання, включно з руйнуванням/реконструкцією кісткової матриці [4–6]. Ремоделювання кістки — це безперервний та динамічний процес резорбції та заміщення частин кальцифікованого кісткового матриксу, який включає координацію остеогенної та остеолітичної активності, що досягається завдяки узгодженій діяльності остеобластів, остеоцитів, клі-

тин, що вистилають кістку, та остеокластів у базових багатоклітинних одиницях [3]. Метою ремоделювання є оптимізація структури та міцності кістки до змінених біомеханічних вимог. Ремоделювання відбувається на всіх типах кісткових поверхонь, включаючи кістку з періостальної та ендостальної сторін, гаверсові канали та поверхню трабекулярної кістки. Одразу ж після ампутації на кінці опилу кукси повинна сформуватись кісткова замикальна пластинка, призначенням якої є герметизація кістковомозкової порожнини і збереження в ній підвищеного внутрішньокісткового тиску [7]. Останній необхідний для того, щоб прогнати кров по системі гаверсових і фолькманівських каналів, забезпечуючи кісткову та кістковомозкову тканини поживними речовинами. Іншою функцією кісткової замикальної пластинки є захист вмісту кістковомозкового каналу, поліпшення підтримання міцності кісткового залишку та забезпечення ходьби [9]. Однак досить часто загоєння і ремоделювання кісткової замикальної пластинки і всієї кукси в силу різних причин порушуються [8–10].

Вивчаючи гострі зміни кісток після ампутації нижньої кінцівки внаслідок травматичного ушкодження перед протезуванням, через 6 та 12 місяців ходьби на протезі [11, 12] виявили значну негативну динаміку. Мінеральна щільність кісткової тканини кульшового суглоба ампутованої кінцівки зменшилась на 11–15 % і зберігалась протягом 12 місяців. За період від ампутації до 6–12 місяців користування протезом кукси кістки мала зниження показників кісткової маси (–26 %), щільності кісткової тканини (–21 %). Паралельно спостерігалось зниження частки кісткової маси $> 650 \text{ мг/см}^3$ (від 58 до 43 % від загальної площі) або $> 480 \text{ мг/см}^3$ (від 65 до 53 %), що свідчило про збільшення пористості кортикального шару. Також прогресивно збільшувались маркери резорбції кісткової тканини. Унаслідок ремоделювання швидкі і суттєві втрати вмісту та міцності кісткової тканини наставали невдовзі після ампутації та не відновлювались протягом 12 місяців користування протезом [13]. За даними [14], поряд зі зниженням МЩКТ ампутованої сторони зменшувалась площа поверхні залишку на кінці порівняно з аналогічним зрізом інтактною кінцівки, що підвищувало ризик остеопорузу та переломів кістки. Стурбованість можливістю виникнення переломів кукси кістки внаслідок несвоєчасного і неякісного протезування висловлювали й інші дослідники [14]. На думку [1, 10, 15–18], змінений режим ходьби, зменшене навантаження, відсутність м'язової активності призводять до порушення ремоделювання кістки. Унаслідок порушень репаративної регенерації [8] відмічали зміни структурної організації кукси з утворенням конусоподібних і булавоподібних кукс, порушення формування кісткової замикальної пластинки [9]. Описано [19] негативний вплив післяампутаційного больового синдрому на формування кукси кістки. За даними [20], які спостерігали двосторонні стресові переломи кісток кукс внаслідок хронічного компартмент-синдрому, він викликав

порушення кровопостачання та патологічне ремоделювання гомілкових кісток.

Таким чином, на сьогодні відсутні цілеспрямовані дослідження особливостей ремоделювання кукси кістки. Відомі клінічні роботи мають фрагментарний характер, обмежуються констатацією втрати кісткової тканини, не відображають сутності процесів ремоделювання і не пропонують шляхи їх можливого поліпшення [1, 15–17]. Поодинокі експериментальні дослідження регенерації і формування ампутаційних кукс [8] вивчали ремоделювання кукси кістки в спокої. Але кукса — функціональний орган, призначенням якого є забезпечення опори і ходьби з ударними навантаженнями. Ці навантаження надходять на основну опорну тканину — кістку, яка в нормі динамічно ремоделюється протягом життя [21]. Згадуваний процес руйнування/реконструкції [4–6] може змінити та реорганізувати кісткову тканину кукси так, що її мікроструктури будуть змушені по-різному реагувати на механічні навантаження. Згідно з даними [22, 23], частота повторних операцій на куксі після травматичних ампутацій становила 41,9–48,8 %, що також свідчить про необхідність поглибленого вивчення особливостей ремоделювання кісткової тканини кукси та пошуку способів його поліпшення.

Мета дослідження: дослідити особливості ремоделювання кукси кістки та можливості його оптимізації в умовах герметичного і негерметичного закриття кістковомозкової порожнини під час ампутації та механічного навантаження.

Матеріали та методи

На 36 статевозрілих кролях масою 2,5–3 кг проведено 4 серії дослідів з ампутацією стегна на рівні середньої третини. У I серії під опилом кістки зшивали м'язи-антагоністи. У II, крім міопластики, після операції проводили циклічне механічне навантаження торцевої поверхні кукси. У III серії кістковомозкову порожнину кукси герметично закривали тонким губчастим автотрансплантатом і проводили міопластику. У IV серії, крім герметичного закриття кістковомозкової порожнини автотрансплантатом і міопластики, проводили механічне навантаження торцевої поверхні кукси. Механічні циклічні навантаження кукси в II і IV серіях проводили через 4, 8, 16 тижнів після ампутації ударною хвилею, сфокусованою на торцевій поверхні з енергією $0,5 \text{ мДж/мм}^2$, частотою 2 Гц з подачею 400 імпульсів за сеанс. Усього проводили 12 сеансів по 1 разу на добу. Терміни спостереження — 6–10–18 тижнів. Для знеболювання перед процедурою механічного навантаження тваринам внутрішньом'язово вводили комбінацію кетаміну (40 мг/кг) та ксилазину (5 мг/кг). Для максимального наближення до протезування перед сеансом куксу поміщали в пневматичну манжету, у якій створювали тиск 30 мм рт.ст.

Перед виведенням з досліду тваринам вводили внутрішньоартеріально 3000 ОД гепарину на фізіологічному розчині. Через 15 хвилин внутрішньовенно швидко вводили летальну (0,5 мл) дозу гексеналу

та перев'язували черевну аорту. Нижче від лігатури вводили канолю від системи для внутрішньоартеріального нагнітання, фіксуючи її в просвіті судини, і наливали 10% туш-желатинову суміш. Через добу відокремлювали стегнову кістку в кульшовому суглобі. Давали візуальну оцінку взаємин м'яких тканин з кісткою, після чого куксу стегна звільняли від м'яких тканин, залишаючи їх лише по торцевій поверхні. Здійснювали фіксацію препарату у 12% розчині формаліну та декальцинацію його за допомогою 15% розчину азотної кислоти. Робили сагітальний зріз через середину кістки, який заливали блоком у целоїдин. Зрізи товщиною 15–30 мкм забарвлювали гематоксиліном та еозином і за Ван Гізеном. Робили і про-світлені зрізи. Морфологічне дослідження включало мікроскопічне вивчення гістотопографічних і звичайних гістологічних зрізів кісткової тканини. Оцінювали стан мікроциркуляторної мережі кістки та м'язів, заповненої туш-желатиною сумішшю, враховували (без спеціальних вимірювань) щільність розташування судин та їх діаметр.

Для кількісної оцінки структур тканин кукси проводили морфометричне дослідження.

На проведення експериментальних досліджень отримано дозвіл № 4 Комітету з біоетики Науково-дослідного інституту реабілітації осіб з інвалідністю ВНМУ ім. М.І. Пирогова від 23.09.2023 р. Дослідження проводилось відповідно до принципів гуманного поводження з тваринами, викладених у директивах Європейського співтовариства (86 (609) ЄС) та Гельсінській декларації про гуманне поводження з тваринами.

Статистичний аналіз. Оцінку статистичних відмінностей між групами проводили за допомогою непараметричного тесту Крускала — Волліса (Cruskal-Wallis test). Цей тест застосовувався для перевірки наявності статистичних відмінностей між чотирма незалежними групами, не припускаючи нормальності розподілу даних. З кожної групи дані були об'єднані та проранжовані. Після ранжування для кожної групи була обчислена сума рангів, яка стала основою для подальших розрахунків. Отриману статистику H порівнювали з критичним значенням з таблиці χ^2 -квадрат, враховуючи кількість ступенів свободи $k - 1$ (де k — кількість груп). При p -значенні тесту, меншому за рівень значущості ($\alpha = 0,05$), нульову гіпотезу відкидали. У разі відхилення нульової гіпотези було проведено *post-hoc* аналіз для з'ясування, які саме групи відрізняються між собою. Для цього застосовувався тест Манна — Уїтні, який дозволяв порівнювати пари груп та визначати, між якими саме групами є статистично значущі відмінності.

Результати

Міопластика без механічного навантаження (9 спостережень)

Термін 6 тижнів, 3 спостереження. В усіх спостереженнях сформовані кукси циліндричної форми. На кінці опилу кістки на основі ендостального кісткоутворення починала формуватись кісткова замикальна

пластинка з примітивних кісткових балок. Судини міжбалкових просторів періостального й ендостального кісткоутворення були різнокаліберні, з явищами підвищеної проникності. По лінії торцевої поверхні опилу виявлялась пухка волокниста тканина. У неї зі сторони кістковомозкового каналу і потовщеного окістя вросли судини синусоїдного типу та клітинно-волокниста тканина остеобластичного типу. У кістковомозковому каналі спостерігались розширені судини з нечіткими контурами стінок, нерівномірним заповненням тушшю і її дифузиею в оточуючі тканини. Визначалась значна кількість судин синусоїдного типу і тканинних кіст, зв'язаних з мікросудинною сіткою. Кортикальна діафізарна пластинка витончена, з дистрофічними змінами. Опил кістки містив аваскулярні ділянки. Поряд з площиною опилу спостерігались розширені гаверсові і фолькманівські канали. У них були розташовані поодинокі розширені і дрібні множинні проліферуючі судини з дифузиею туші в периваскулярний простір. У міжбалкових просторах визначались остеобластична тканина та набряк кісткового мозку.

Термін 10 тижнів, 3 спостереження. У двох спостереженнях сформований конусоподібний, в одному — булавоподібний кінець кукси. Ендостальне і періостальне кісткоутворення в зоні кінця кукси зменшувалось, хоча було представлено більш зрілими балковими структурами. Кісткова тканина частково сформованої замикальної пластинки різного ступеня зрілості, що свідчить про незавершеність ремоделювання. Кортикальна діафізарна пластинка тонка. Спостерігалась її резорбція за ходом судинних каналів і зі сторони медулярної порожнини. У зонах резорбції кісткової тканини сформувались кістковомозкові порожнини, заповнені пухкою волокнистою тканиною, жировим кістковим мозком, капілярами синусоїдного типу, тканинними кістами. Процеси остеокластичної резорбції викликали вогнищеву спонгізацію, витончення кортикальної пластинки, зміну форми кукси. На окремих ділянках кортикальна діафізарна пластинка втрачала остеонну будову. У компактній кістці спостерігали лізис остеоцитів, некроз вмісту центральних каналів, зникнення клітин у гаверсових каналах. В одному спостереженні між балками ендостального кісткоутворення виявлялись просвіти а. *nutricia* і її гілок, які переходили з кістковомозкової порожнини у волокнисте оточення кукси і створювали перешкоди для формування кісткової замикальної пластинки. У дистальному і проксимальному відділах кістковомозкової порожнини спостерігалась набрякла пухка волокниста тканина з судинами синусоїдного типу. У двох випадках відмічалось викривлення осі кукси з її розширенням в проксимальному відділі кістковомозкового каналу після перенесеного стресового перелому.

Термін 18 тижнів, 3 спостереження. Форма кукси в одному спостереженні була циліндричною, в одному — конусоподібною, а ще в одному — роздвоєною. Для всіх спостережень цього терміну характерними

були прогресуюче зменшення мікроциркуляторної сітки, порушення судинної проникності, розвиток периваскулярного набряку, зникнення клітин у судинних каналах кортикальної діафізарної пластинки, резорбція кісткової тканини за ходом судинних каналів і ендостальної поверхні на фоні зниження проліферативних процесів у кістковій і кістковомозковій тканинах, часткове заміщення жирового кісткового мозку пухкою волокнистою тканиною. Спостерігались виражені явища ремоделювання з переважанням резорбції з утворенням широких міжкісткових просторів. Гаверсові канали залишались розширеними. Наставало значне розсмоктування кісткових структур з вогнищевою інфільтрацією плазматичними та лімфоїдними клітинами. Рарефікація супроводжувалась зменшенням кількості і товщини кісткових балок, а також клітинних елементів. У кісткових порожнинах витончених кісткових балок зникали остецити. У середині кісткових балок з'являлись мікротріщини. Мікропереломи кісткових балок супроводжувались незначними крововиливами. У них формувались утворення, що скріплювали край зламаних кісткових балок, будучи основою, на якій розвивались репаративні процеси. У набряклому кістковому мозку відмічалась проліферація фіброретикулярних клітинних елементів з появою ділянок волокнистого кісткового мозку. Спостерігались розширені вени і численні капіляри синусоїдного типу.

У двох спостереженнях в компактному шарі визначалась незріла кісткова тканина після загоєння стресових переломів. У кістковомозковому каналі виявлялись ендостально утворені кісткові структури, що звужували його просвіт.

Міопластика з механічним навантаженням кукси кістки з подачею 400 імпульсів за сеанс 1 раз на день (9 спостережень)

Термін 6 тижнів, 3 спостереження. Механічне навантаження розпочато через 4 тижні після ампутації. В усіх спостереженнях були сформовані кукиси зі значним розширенням кінця кістки за рахунок виражених періостально-ендостальних регенератів, які деформували кінець кукси, надаючи йому булавоподібну форму. Внаслідок злиття цих відкладень контури кортикальної діафізарної пластинки в дистальному відділі не визначались. Кісткова замикальна пластинка не сформована. У дистальному відділі кістковомозкового каналу визначались незрілі балки ендостального регенерату та осередки некротизованого кісткового мозку. Структура періостальних регенератів представлена балками різної зрілості. В одному спостереженні їх покриває широка зона гіалінового хряща. На опилі кукси кістки нижче від ендостального регенерату визначались вогнища незрілої фіброзної тканини з осередками незрілих кісткових балок та ділянки хрящової тканини. Спостерігались посттравматичні крововиливи та запальна клітинна інфільтрація з поліморфноядерних лейкоцитів та плазматичних клітин. Частина хрящових клітин знаходилась в стані

руйнації. У проксимальному відділі кортикальна діафізарна пластинка потовщена, спонгізована. Спостерігалось розширення судинних каналів компактною безостецитної кістки. У багатьох з них відсутні клітинні елементи. У зв'язку з периваскулярним набряком відмічалось пристінкове розміщення капілярів. Відмічали зменшення кількості та розміру округлих остецитів, їх апоптоз та значне посилення остеокластичної резорбції кісткової тканини. Відмічався плазмостаз, некроз вмісту центральних каналів. У місцях витончення кортикальної пластинки виявлені стресові переломи кісткових балок та остеобластична тканина з остеокластами.

У двох спостереженнях в кістковомозковому каналі спостерігалась наявність великих кіст. Кісти охоплювали майже весь діаметр каналу, лише поруч зі стінками збереглися тонкі смужки пухкої волокнистої тканини. Тут спостерігались стресові переломи кортикальної діафізарної пластинки. Дном щілини перелому був некротизований кістковий мозок. У третьому спостереженні цього терміну на тлі великого періостального регенерату, який знаходився вище країв кінця кукси, стався стресовий перелом.

Термін 10 тижнів, 3 спостереження. Функціональне навантаження розпочато через 8 тижнів після ампутації. В усіх трьох спостереженнях отримані кукиси циліндричної форми. На кінці опилу спостерігався ендостальний регенерат, по нижньому краю якого сформувався кістковий замикальний шар із досить зрілої кісткової тканини остеонно-балкової будови. У кістковій тканині в значній кількості були наявні остеобласти і остецити. По його нижньому краю визначались зазубрини з наявністю гаушипових лакун та остеокластів. Кортикальна діафізарна пластинка була нерівномірно потовщена, з ділянками деякого витончення. Гаверсові канали розширені, з наявністю в них судин і остеогенної тканини. У місці її контакту з замикальним шаром виявилися зазубрини. У міжбалкових просторах визначались жировий кістковий мозок та пухка волокниста тканина з незначною кількістю тканинних кіст та судин синусоїдного типу. У проксимальному відділі кістковомозкового каналу судини мікроциркуляторного русла наближені до нормальних.

Термін 18 тижнів, 3 спостереження. Функціональне навантаження розпочато через 16 тижнів після ампутації. У двох спостереженнях були сформовані кукиси булавоподібної, в одному — конусоподібної форми. В одному випадку діафізарна кортикальна пластинка була потовщена, спонгізована, місцями витончена. У дистальному відділі настала її повна резорбція. На відстані 2 см від кінця кукси сформувався хибний суглоб, який охоплював обидві кортикальні пластинки без порушення цілісності великого періостального регенерату. Кісткова замикальна пластинка не сформована. Кінець кістковомозкового каналу був заповнений пухкою волокнистою тканиною, кістковими балками, судинами синусоїдного типу, тканинними кістами. У проксимальному відділі кістковомозкового каналу ви-

значалась дифузія туші, набряк, судини синусоїдного типу. Спостерігалось значне розширення судинних каналів компактної безостеоцитної кісткової тканини. Частина з них закупорена форменими елементами. Відмічали плазмостаз, некроз вмісту центральних каналів, витончення кісткових балок, переважання кількості активних остеокластів над остеобластами, розширені остеокитарні порожнини. У проксимальному відділі кістковомозкового каналу визначалась набрякла пухка волокниста тканина з судинами синусоїдного типу.

У другому спостереженні сформований деформований кінець кістки з викривленням осі, збільшенням поперечного розміру за рахунок плоского поздовжнього розташованого періостального регенерату та злиття періостального й ендостального регенератів. Як і в попередньому випадку, дистальний кінець кісткової кукси протягом двох сантиметрів розсмоктався. Спостерігались дегенеративно-дистрофічні і некротичні зміни кортикальної діафізарної пластинки і кісткового мозку. Кісткова замикальна пластинка не сформована.

У конусоподібній куксі відмічалась рарефікація і вогнищеве розсмоктування кортикальної пластинки. У звуженому каналі кінця кукси визначались зони незрілої кісткової тканини. Унаслідок резорбції і накладання новоутворених кісткових балок спостерігалась спонгізація кортикальної діафізарної пластинки.

У всіх трьох спостереженнях процеси резорбції переважали остеогенез.

Кісткова пластика без механічного навантаження (9 спостережень)

Термін 6 тижнів, 3 спостереження. У всіх спостереженнях сформовані кукси циліндричної форми з незначним розсмоктуванням країв кортикальної діафізарної пластинки в місці її контакту з трансплантатом, що герметизував кістковомозкову порожнину. Ремоделювання тонкого кісткового трансплантата проходило шляхом його заміщення ендостальною кістковою тканиною і формування кісткової замикальної пластинки. Кісткова тканина замикальної пластинки майже зріла. Кровообіг кінця кукси забезпечувався за рахунок судин оточуючих м'яких тканин, періосту, гаверсових каналів кортикальної діафізарної пластинки. Спостерігалось розширення гаверсових каналів. У міжбалкових просторах визначався жировий кістковий мозок, пухка волокниста тканина, судини синусоїдного типу. У проксимальному відділі кістковомозкового каналу спостерігався жировий кістковий мозок, судини синусоїдного типу.

Термін 10 тижнів, 3 спостереження. В усіх спостереженнях форма кінця кукс була циліндричною. Зберігалось розширення судинних каналів кортикальної діафізарної пластинки. Уздовж кукси у поверхневих шарах кортикальної діафізарної пластинки визначалась мережа широких судин, які тісно анастомозували з судинами періосту та медулярної порожнини. Судини останньої залишалися розширеними. У дистальному відділі кукси зустрічались судини синусоїдного типу і тканинні кісти. Кінці кукс були плоскими. Кортикаль-

на діафізарна пластинка прослідковувалась по всій довжині кукси. Відмічалась її резорбція та деяке витончення по ендостальній поверхні. У дистальному відділі кістковомозкового каналу на значній відстані вздовж спонгізованої кортикальної діафізарної пластинки виявлялась сітка не зовсім зрілих кісткових балок. Вони були витончені й узуровані. На поверхні кісткової тканини відмічалось значне зменшення кількості активних остеобластів. У проксимальних відділах між кістковими балками спостерігався жировий кістковий мозок і пухка волокниста тканина із заповненими тушню мікросудинами. У кістковомозковому каналі кінця кукси визначалась негуста сітка досить зрілих кісткових балок. Кісткова замикальна пластинка остеонно-балкової структури.

Термін 18 тижнів, 3 спостереження. В усіх спостереженнях сформовані кукси циліндричної форми. Тонкий кортикальний трансплантат заміщений балковою структурою кісткової замикальної пластинки з не зовсім зрілої кісткової тканини. Кортикальна діафізарна пластинка на значній відстані від краю була спонгізована. Відмічалось розсмоктування кісткової тканини за ходом судинних каналів і вздовж ендостальної поверхні кортикальної діафізарної пластинки. У значно розширених гаверсових каналах визначались капіляри синусоїдного типу. Визначалась нерівномірність і бідність мікросудинної сітки, явища пристінкового набряку. Виявлялись порожні лакуни остеокитів. На поверхні кісткових трабекул спостерігалась активізація остеокластів. Остеобласти виявлялись в меншій кількості, що свідчить про незавершеність ремоделювання. Міжбалкові простори заповнені жировим кістковим мозком і пухкою волокнистою тканиною, більшість судин була синусоїдного типу. У проксимальних відділах жировий кістковий мозок зі звичайною мікроциркуляторною мережею.

Кісткова пластика з механічним навантаженням (9 спостережень)

Термін 6 тижнів, 3 спостереження. У всіх спостереженнях сформовані кукси органотипової форми. На кінці кукси виявлялась негуста сітка ендостальних кісткових балок, по нижньому краю яких формувалась кісткова замикальна пластинка. У чотирьох препаратах вона складалась зі зрілої, а в одному — з не зовсім зрілої кісткової тканини. У міжбалкових просторах ендостального кісткоутворення у всіх спостереженнях виявлялись пухка волокниста тканина з прошарками фіброретикулярної остеобластичної тканини і судини мікроциркуляторного русла. У проксимальних відділах кістковомозкового каналу спостерігався жировий кістковий мозок з нормально розвинутою мікросудинною сіткою. Кортикальна діафізарна пластинка значно потовщена за рахунок періостальних нашарувань, які інтенсивно компактизувались. У їх периферичних відділах виявлялись розширені центральні канали. У глибоких відділах періостальні нашарування повністю компактизовані. Судинні канали кортикальної діафізарної пластинки розширені. В одному випадку спо-

стерігалось порушення ходу судинних каналів. У них знаходились збільшені в діаметрі проліферуючі судини і новоутворені капіляри. Навколо них формувались кісткові структури типу остеоцитів. Вони рівномірно забарвлені. Судини в кісткових каналах розташовані пристінково. Гілки а. nutriticia в проксимальному відділі кістковомозкового каналу значно розширені. В остеобластичній тканині міжкісткових просторів визначалась значна кількість остеобластів та остеокластів. Відбувався активний процес ремоделювання кісткової тканини з формуванням компактною кістки за рахунок нашарування нової пластинчастої кістки з добре забарвленими ядрами остеоцитів.

Термін 10 тижнів, 3 спостереження. У всіх спостереженнях сформовані кукси циліндричної органотипової форми. Відмічалась відсутність прогресування репаративних процесів ендостального і періостального кісткоутворення. Кортикальна діафізарна пластинка значно потовщена за рахунок компактизації періостальних нашарувань, вона добре контурувалась на всьому протязі. У місці входження а. nutriticia локальний остеопороз, мікропереломи і незріла кісткова тканина. Кінець кукси закритий товстою замикальною пластинкою зі зрілої компактною кістковою тканини. Настало звуження судинних каналів кортикальної діафізарної пластинки. Структура кісткової тканини стабільна. Дистрофічних змін кісткової тканини і безклітинних ділянок не спостерігалось. У дистальному відділі кістковомозкового каналу жировий кістковий мозок із заповненими тушшю мікросудинами, близькими до судин нормальної кістки. У проксимальному відділі кістковомозкового каналу жировий кістковий мозок

з характерною судинною сіткою. Мікроциркуляторні зміни компенсаторного характеру завершувались.

Термін 18 тижнів, 3 спостереження. У всіх трьох спостереженнях сформовані кукси циліндричної форми з рівними потовщеними органної будови стінками кортикальної діафізарної пластинки і замикальної кісткової пластинки компактною будови. Ремодельовання кісткової, кістковомозкової та судинної систем завершувалось. Структури кортикальної діафізарної, кісткової замикальної пластинок, кісткового мозку, макро- та мікроциркуляторного русла були наближені до норми. Нових процесів кісткоутворення не відмічено. Періостальні нашарування повністю компактизовані.

Таким чином, герметичне закриття кістковомозкової порожнини, поєднане з механічним навантаженням, сприяло оптимальному перебігу репаративного остеогенезу і процесів ремоделювання тканин кукси.

Кількісна оцінка структури тканин ампутаційної кукси в термін 8 міс. наведена в табл. 1. Проведений морфометричний аналіз тканин ампутаційної кукси дозволив встановити вірогідні відмінності у співвідношенні остеогенної, хондрогенної та фіброгенної тканин між дослідними групами ($H = 17,1387-15,6448$; $P < 0,01$ за критерієм Крускала — Волліса) (табл. 1). Отримані показники свідчать про різний ступінь завершеності та ремоделювання кісткової тканини залежно від виду пластики та функціонального навантаження.

Обговорення

Ремодельовання кісткової тканини — це постійний біологічний процес, який забезпечує оновлення скелетної тканини, збереження її міцності та регуляцію

Таблиця 1. Кількісна оцінка структури тканин ампутаційної кукси

Дослідні групи	Структура тканин, %		
	Остеогенна, $M \pm SD$	Хондрогенна, $M \pm SD$	Фіброгенна, $M \pm SD$
I група (м'язова пластика без навантаження) ($n = 3$)	$72,80 \pm 3,11$	$10,80 \pm 2,28$	$16,40 \pm 3,51$
II група (м'язова пластика з навантаженням) ($n = 3$)	$78,60 \pm 2,70$	$10,20 \pm 1,31$	$11,20 \pm 3,35$
III група (кісткова пластика без навантаження) ($n = 3$)	$85,20 \pm 2,28$	$8,40 \pm 1,12$	$6,40 \pm 2,51$
IV група (кісткова пластика з навантаженням) ($n = 3$)	$91,20 \pm 2,17$	$4,60 \pm 1,14$	$4,20 \pm 1,64$
H Kruskal-Wallis test	17,1387	13,463	15,6448
p -значення	0,0007	0,0037	0,0013
Попарне порівняння			
$P_{I, II}$	$< 0,05$	$< 0,01$	$> 0,05$
$P_{I, III}$	$< 0,01$	$< 0,01$	$< 0,01$
$P_{I, IV}$	$< 0,05$	$< 0,01$	$< 0,01$
$P_{II, III}$	$< 0,01$	$> 0,05$	$< 0,05$
$P_{II, IV}$	$< 0,01$	$> 0,05$	$< 0,01$
$P_{III, IV}$	$< 0,05$	$> 0,05$	$< 0,05$

системного кальцієвого гомеостазу. Він відбувається за участю взаємодії чотирьох основних типів клітин: остеокластів, які відповідають за резорбцію старої кістки, остеобластів, що утворюють нову кісткову тканину, остеоцитів, які виконують роль механосенсорів, і регуляторів ремоделювання, клітин кісткової вистілки, що пригнічують резорбцію кістки, не допускаючи прямої взаємодії між кістковим матриксом та остеокластами в базовій багатоклітинній одиниці. Баланс між цими процесами забезпечує нормальну структуру і функцію кісток [25]. Остеоцити та остеобласти в кістці можуть реагувати як на потік рідини, так і на механічну деформацію, що виникають внаслідок механічного навантаження [26, 27]. Процес ремоделювання кісткової тканини поділяється на 6 фаз [28]: активації, рекрутування, резорбції, реверсії, формування, мінералізації.

Ампутація кінцівки справедливо називається реконструктивною операцією. При її виконанні необхідно створити умови для ієрархічно закладеного подальшого ремоделювання кісткового залишку зі структурою, максимально наближеною до нормальної кістки. У замкнутій кістковомозковій порожнині наявний тиск, який необхідний для спрямування потоку інтерстиціальної рідини по системі судинних каналців. Додатковий тиск у замкнутому кістковомозковому каналі створюється шляхом передачі пульсації гілок живильної артерії через напіввідкрите середовище кістковомозкового каналу на стінки дрібних судин і капілярів. За відсутності герметичного закриття кістковомозкового каналу тиск у кістковомозковій порожнині падає, що порушує кровопостачання кортикальної діафізарної пластинки навіть при відносному збереженні медулярного кровопостачання. Порушення кровопостачання поглиблюються перетином періосту і пошкодженням оточуючих кістку м'язів.

У терміні 6 тижнів адаптаційно-компенсаторний комплекс, що забезпечував умови репарації і ремоделювання кісткової тканини кукси, був майже однаковим для I і II серій. Виявлені стереотипні зміни мікроциркуляції кукси: регіонарна гіперваскуляризація, збільшення об'єму термінального судинного русла з синусоїдними змінами капілярів і підвищенням судинної проникності, формування тканинних мікрокіст, зв'язаних з мікросудинною сіткою. Ці зміни були спрямовані на компенсацію циркуляторних розладів і забезпечення підвищених метаболічних потреб регенеруючих тканин за рахунок максимального використання позасудинних шляхів мікроциркуляції. У подальші терміни залежно від серії процеси регенерації і ремоделювання тканин кукси значно різнились.

У 10-тижневий термін у I серії спостерігалась виражена резорбція кортикальної діафізарної пластинки за ходом судинних каналів та зі сторони медулярної порожнини. Вона призводила до вогнищевої спонгізації, витончення пластинки, зміни форми кінців кукси в триох спостереженнях. У компактній кістці наставали дистрофічні та некротичні процеси, які характеризувались лізисом остеоцитів, некрозом вмісту центральних каналів, бідністю гаверсових каналів, розвитком ос-

теопору. Унаслідок неповноцінного ендостального регенерату на кінці кукси відмічалась його перфорація гілками а. nutriticia. У пізній термін у більшості спостережень був сформований патологічний кінець кукси. У двох випадках відмічені зрощені стресові переломи. Процеси ремоделювання з переважанням резорбції та неповноцінним заміщенням кісткової тканини продовжувались. Виражена рарефікація супроводжувалась зменшенням кількості і товщини кісткових балок та клітинних елементів. У середині кісткових балок з'являлись мікротріщини. У набряклому кістковому мозку продовжувалась проліферація фіброретикулярних клітин з появою ділянок волокнистого кісткового мозку. Відмічалась атрофія кісткової тканини, відсутність репаративних процесів на фоні стійких циркуляторних змін, що супроводжувались збідненням артеріальної і венозної сітки при збереженні деякого розширення венозного дренажу.

Таким чином, у першій серії дослідів спостерігалось порушення ремоделювання з переважанням резорбції, формуванням атипових форм кінців з відхиленням від осі, стресовими переломами, різко вираженою спонгізацією кортикальної діафізарної пластинки чи її розсмоктуванням, пенетрацією ендостального неповноцінного регенерату гілками живильної артерії. Ці патологічні зміни виникали на тлі значних порушень мікроциркуляції. На нашу думку, патологічне ремоделювання було викликане недостатнім тиском у кістковомозковій порожнині та відсутністю механічного навантаження, що суттєво послаблювало потік інтерстиціальної рідини.

Зважаючи на викладене, у II серії застосоване механічне навантаження кукси кістки, яке, на нашу думку, повинно було позитивно вплинути на ремоделювання кісткової тканини, посиливши остеогенні та ангіогенні реакції.

Проте ранній (4 тижні) початок навантаження призвів до травматизації і пошкодження нижніх новоутворених судин і ендостального регенерату на кінці кукси кістки, що викликало вторинні порушення мікроциркуляції. Ці порушення мікроциркуляції, що виникають, змінюють умови перерозподільної компенсації порушеного кровопостачання в кістці і викликають резорбцію кортикальної діафізарної пластинки, що ми і спостерігали. Формування ендостально-періостальних регенератів у відповідь на механічне навантаження можна віднести до адаптаційного ремоделювання кісткової тканини. Про недостатність кровопостачання і адаптаційне ремоделювання свідчить і поява хрящового покриття періостальних регенератів, особливістю якого є дифузійний характер трофіки. Відсутність формування кісткової замикальної пластинки, некроз кісткового мозку, зменшення кількості остеоцитів, їх апоптоз, некроз вмісту центральних каналів свідчать про дегенеративно-дистрофічні та некротичні процеси. Порушення репаративного остеогенезу і ремоделювання призвели до формування в кістковомозковому каналі великих кіст. Ранній початок механічного навантаження ви-

кликав запальний процес і патологічне ремоделювання тканин, що оточували кістку.

Таким чином, механічне навантаження кінця кукси кістки, розпочате в термін 4 тижні після операції, є передчасним і шкідливим.

У термін 10 тижнів з початком механічного навантаження через 8 тижнів після ампутації отримані задовільні результати ремоделювання кісткової тканини. Кукси кістки мали органотипову циліндричну форму з кістковою замикальною пластинкою з не зовсім зрілої кісткової тканини. Відмічалась певна нормалізація мікроциркуляторних процесів. Такі результати можна пояснити оптимальним терміном початку механічного навантаження, коли вже сформувався кортикальний замикальний шар достатньої міцності, забезпечувалось достатнє кровопостачання і механічна стимуляція не викликала місцевих порушень кровопостачання і негативного впливу на остеогенез.

На нашу думку, патологічне ремоделювання кісткової тканини кукс під впливом механічного навантаження в термін 18 тижнів після ампутації має дві причини. Перша і головна причина — це тривала, протягом 16 тижнів відсутність функції скомпрометованої ампутацією кінцівки, яка викликала порушення місцевого і внутрішньокісткового кровопостачання. Унаслідок зміни умов мікроциркуляції змінювались функціональні співвідношення між внутрішньокістковими і параосальними басейнами кровопостачання, що викликало перерозподіл току крові і адапційну перебудову кісткової тканини з формуванням остеопору [11].

Іншою можливою причиною, теж пов'язаною з кровопостачанням і остеогенезом, є ступінь жорсткості позаклітинного матриксу. Відомо [29], що отриманий з преостеобластів позаклітинний матрикс, який є механочутливою структурою, забезпечує кісткову клітинну тривимірним оточенням та змінною жорсткістю. Остання має значний вплив на поведінку остеоцитів. Сформований компактний матрикс сприяє дозріванню остеобластів. Пухкий матрикс, який сформований при остеопорозі, сприяє надмірній активації остеокластів. На м'якому матриксі відкладається остеод без утворення кісткової тканини [29]. Відповідно, це впливає на структурні зміни кісткової тканини з витонченням та узурацією кісткових балок, збільшенням кількості порожніх остеокітарних лакун, зменшенням кількості активних остеобластів. З огляду на неоднорідний склад новоутворених кісткових структур, коли ділянки кісткової тканини пластинчастої будови тісно межували з вогнищами сполучної тканини, можна дійти висновку про порушення мінералізації кісткової тканини.

Таким чином, механічне навантаження на скомпрометовану куксу кістки не поліпшує процес ремоделювання. У частині випадків він, як і в першій серії, набув характеру патологічного ремоделювання зі зміною форми, архітектури та стресовими переломами.

У першій і другій серіях при порушеній мікроциркуляції та недостатньому надходженні кисню і поживних речовин клітини фіброретикулярної тканини

диференціювались у фіброblastи, які продукували сполучну волокнисту тканину. У деяких випадках фіброретикулярна тканина диференціювалась у хрящову. У зв'язку з несприятливими умовами відновлення мікроциркуляції ремоделювання продовжувалось і у віддалені терміни. Виникали повторні репаративні цикли. Відсутність герметизації кістковомозкового каналу призвела до порушення ремоделювання, яке посилювалось пенетрацією ендостального регенерату гілками живильної артерії. Така функціональна розгерметизація ще більше поглиблювала і подовжувала розлади мікроциркуляції.

Герметичне закриття кістковомозкового каналу в III серії завдяки відновленню інтерстиціального тиску дозволило в місячний термін відновити порушене кровопостачання, пришвидшити процеси регенерації і ремоделювання кісткової тканини. Встановлено суттєві переваги герметичного закриття кістковомозкового каналу кістковим трансплантатом, яке в термін 6 тижнів дозволило зберегти притаманний нормі внутрішньокістковий тиск і запустити мікроциркуляцію і репаративні процеси іншої якості. Проте в термін 10 тижнів унаслідок відсутності навантаження розпочався процес розвитку остеопору. Він не був критичним, але поступово поглиблювався у віддалені терміни. Таким чином, для підтримання належного рівня ремоделювання, який би забезпечував стійкий результат, герметичного закриття кістковомозкової порожнини недостатньо.

У IV серії з щільним закриттям кістковомозкової порожнини і механічним навантаженням у результаті ремоделювання сформовані кукси циліндричної форми з потовщеною кортикальною діафізарною пластинкою з компактною кістковою тканиною. Прогресувало подальше ремоделювання судинних каналів з їх звуженням. Свіжі репаративні та дистрофічні процеси в кістковій і кістковомозковій тканинах були практично відсутні. Мікроциркуляція наближалась до нормальної.

Стискаючи герметично закрити куксу кістки, механічне навантаження посилює міграцію інтерстиціальної кісткової рідини, стимулює остеогенез та пригнічує розвиток остеокластів [24]. Підвищений тиск рідини в кістковомозковому каналі посилює транскортикальний потік рідини, створюючи напруги зсуву на кісткові клітини та активуючи механічні реакції [30]. Підвищений рівень зсувного напруження пов'язаний зі зниженою експресією гена RANKL, що сприяє підвищенню мінеральної щільності кісток [31]. Знижений рівень призводить до некрозу остеоцитів, унаслідок чого вивільняються молекули, пов'язані з пошкодженням. Вони активізують остеокласти. Відомо також [32, 33], що зсувне напруження безпосередньо модулює диференціацію остеокластів і остеобластів від їх клітин-попередників. Посилена васкуляризація формується завдяки збільшенню потоку інтерстиціальної рідини через нещільну природу капілярів [34]. За даними [35], васкуляризація може змінювати функцію остеобластів шляхом вивільнення ендотеліну та оксиду азоту. Ендотелін посилює синтез ДНК та гальмує активність лужної фосфатази в остеобластах, посилюючи їх проліферацію [36, 37], пригнічу-

ючи резорбцію кісток [38]. Цей ендотеліальний фактор також пригнічує резорбцію кісток. У свою чергу, оксид азоту пригнічує резорбцію кісток шляхом гальмування поширення остеокластів [37].

Таким чином, кращі результати ремоделювання кісткової тканини кукс в III і IV серіях обумовлені як закриттям кістковомозкового каналу, так і механічним навантаженням.

Наше дослідження має низку обмежень. Використовуване в роботі механічне навантаження кістки проводилось без урахування фази ремоделювання, хоча терміни його початку збігаються з різними фазами. Не досліджені різні типи та величини механічного навантаження. Невідповідна стимуляція може перешкоджати остеогенним функціям, одночасно сприяючи надмірній активності остеокластів. Не проведено досліджень цитокінів, кодуєних ферментів генів, білків кісткового матриксу та транскрипційних факторів, що регулюють локальне ремоделювання кісток. У майбутньому необхідно провести додаткові дослідження для з'ясування ролі, обмежень, недоліків та проблем застосування механічних навантажень кістки.

Висновки

Початок механічного навантаження через 4 тижні після міопластичної ампутації викликає поглиблення дегенеративно-дистрофічних і некротичних процесів в куксі кістки внаслідок пошкодження судин мікроциркуляторного русла й ендостального регенерату на кінці опилу, що призводить до значних порушень мікроциркуляції та патологічного ремоделювання кісткової тканини зі зміною форми, архітектури, розвитку остеопору та стресових переломів.

Герметичне закриття кістковомозкової порожнини під час ампутації дозволяє розпочати механічне навантаження кукси кістки через 4 тижні після ампутації та не викликає пошкоджень судинних і кісткових структур кінця кукси.

За відсутності механічного навантаження герметичне закриття кістковомозкової порожнини дозволяє отримати органотипову циліндричну форму кукси вже в термін 6 тижнів після ампутації, що можна розцінити як фізіологічне ремоделювання. У віддалені терміни (10–18 тижнів після ампутації) відсутність механічного навантаження призводить до порушень ремоделювання з розвитком остеопору.

Герметичне закриття кістковомозкової порожнини з механічним навантаженням кукси дозволяє отримати її органотипову форму з повною завершеністю ремоделювання.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Внесок авторів. Шевчук В.І. — остаточне затвердження статті; Бондаренко Д.В. — концепція і дизайн роботи, збір та аналіз даних; Безсмертний Ю.О. — критичний огляд, написання статті.

Список літератури

1. Renstrom PAFH, Alaranta H, Pohjolainen T. Review: leg strengthening of the lower limb amputee. *Critical Reviews™ in Physical and Rehabilitation Medicine*. 1995;7(1):11-32. DOI: 10.1615/CritRevPhysRehabilMed.v7.i1.20.
2. van Velzen JM, van Bennekom CA, Polomski W, et al. Physical capacity and walking ability after lower limb amputation: a systematic review. *Clin Rehabil*. 2006;20(11):999-1016. doi: 10.1177/0269215506070700.
3. Ma Q, Miri Z, Haugen HJ, et al. Significance of mechanical loading in bone fracture healing, bone regeneration, and vascularization. *J Tissue Eng*. 2023 22;14:20417314231172573. doi: 10.1177/20417314231172573.
4. Bonucci E, Ballanti P. Osteoporosis-bone remodeling and animal models. *Toxicol Pathol*. 2014;42(6):957-69. doi: 10.1177/0192623313512428.
5. Datta HK, Ng WF, Walker JA, et al. The cell biology of bone metabolism. *J Clin Pathol*. 2008;61(5):577-87. doi: 10.1136/jcp.2007.048868.
6. Robling AG, Castillo AB, Turner CH. Biomechanical and molecular regulation of bone remodeling. *Annu Rev Biomed Eng* 2006;8:455-498. doi: 10.1146/annurev.bio-eng.8.061505.095721.
7. Shevchuk V, Bezsmertnyi Y, Jiang Y, et al. Vascularization of a bone stump. *Med Glas (Zenica)*. 2024 Feb 1;21(1):214-221. doi: 10.17392/1677-23. <https://orcid.org/0000-0003-1105-4795>.
8. Shevchuk VI, Bezsmertnyi YO, Vezsmertna HV, Dovgalyuk TV, Jiang Y. Changes in the structural organization of bone after amputation. *Polish Annals of Medicine*. 2020;27(2):147-53. /doi.org/10.29089/2020.20.00121.
9. Shevchuk VI, Bezsmertnyi YO, Bezsmertna HV, et al. Reparative regeneration at the end of bone filing after osteoplastic amputation. *Wiad Lek*. 2021;74(3 cz 1):413-417. DOI: 10.36740/WLek202103106.
10. Yazicioglu K, Tugcu I, Yilmaz B, et al. Osteoporosis: A factor on residual limb pain in traumatic trans-tibial amputations. *Prosthet Orthot Int*. 2008;32(2):172-8. doi: 10.1080/03093640802016316.
11. Bemben DA, Sherk VD, Ertl WJJ, Bemben MG. Acute bone changes after lower limb amputation resulting from traumatic injury. *Osteoporos Int*. 2017;28(7):2177-2186. doi: 10.1007/s00198-017-4018-z.
12. Mauntel TC, Marshall SW, Hackney AC, et al. Trunk and Lower Extremity Movement Patterns, Stress Fracture Risk Factors, and Biomarkers of Bone Turnover in Military Trainees. *J Athl Train*. 2020;1;55(7):724-732. doi: 10.4085/1062-6050-134-19.
13. Flint JH, Wade AM, Stocker DJ, et al. Bone mineral density loss after combat-related lower extremity amputation. *J Orthop Trauma*. 2014;28(4):238-44. doi: 10.1097/BOT.0b013e3182a66a8a.
14. Sherk VD, Bemben MG, Bemben DA. BMD and bone geometry in transtibial and transfemoral amputees. *J Bone Miner Res*. 2008;23(9):1449-57. doi: 10.1359/jbmr.080402.
15. Frost HM. Wolff's Law and bone's structural adaptations to mechanical usage: an overview for clinicians. *Angle Orthod*. 1994;64(3):175-88. doi: 10.1043/0003-3219(1994)064<0175:WLABSA>2.0.CO;2.

16. Gailey R, Allen K, Castles J, et al. Review of secondary physical conditions associated with lower-limb amputation and long-term prosthesis use. *J Rehabil Res Dev*. 2008;45(1):15-29. doi: 10.1682/jrrd.2006.11.0147.
17. Rubin CT, Lanyon LE. Regulation of bone formation by applied dynamic loads. *J Bone Joint Surg Am*. 1984;66(3):397-402. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6699056/>.
18. Shevchuk V, Bezsmertnyi Y, Branitsky O, et al. Remodeling of the Fibula Stump After Transtibial Amputation. *Orthop Res Rev*. 2024;16:153-162. doi.org/10.2147/ORR.S459927.
19. Shevchuk V, Bezsmertnyi Y, Jiang Y, et al. Influence of post-amputation pain syndrome on blood circulation in the bone residual limb. *Pain, Joints, Spine*. 2023;13(2):85-92. doi.org/10.22141/pjs.13.2.2023.370.
20. Bezsmertnyi YO, Bondarenko DV, Shevchuk VI, Bezsmertna HV. Bilateral Stress Fractures of Amputated Tibial Stumps in the Setting of Chronic Compartment Syndrome. *Orthop Res Rev*. 2024;16:273-281. doi: 10.2147/ORR.S485472.
21. Lopalco G, Cito A, Iannone F, Diekhoff T, et al. Beyond inflammation: the molecular basis of bone remodeling in axial spondyloarthritis and psoriatic arthritis. *Front Immunol*. 2025 Jul 31;16:1599995. doi: 10.3389/fimmu.2025.1599995.
22. Low EE, Inkellis E, Morshed S. Complications and revision amputation following trauma-related lower limb loss. *Injury*. 2017;48:364-370. doi: 10.1016/j.injury.2016.11.019.
23. Tirrell AR, Kim KG, Rashid W, et al. Patient-reported Outcome Measures following Traumatic Lower Extremity Amputation: A Systematic Review and Meta-analysis. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2021;9(11):e3920. doi: 10.1097/GOX.0000000000003920.
24. Matsuzaki H, Wohl GR, Novack DV, et al. Damaging fatigue loading stimulates increases in periosteal vascularity at sites of bone formation in the rat ulna. *Calcif Tissue Int* 2007;80(6):391-399. <https://doi.org/10.1007/s00223-007-9031-3>.
25. Parfitt AM. Bone remodeling. *Henry Ford Hosp Med J* 1988;36(3):143-144. <https://scholarlycommons.henryford.com/hfhmedjournal/vol36/iss3/4>.
26. Leelarungrayub D, Saidee K, Pothongsunun P, et al. Six weeks of aerobic dance exercise improves blood oxidative stress status and increases interleukin-2 in previously sedentary women. *J Bodyw Mov Ther*. 2011;15(3):355-362. doi: 10.1016/j.jbmt.2010.03.006.
27. Santos RV, Viana VA, Boscolo RA, et al. Moderate exercise training modulates cytokine profile and sleep in elderly people. *Cytokine*. 2012;60(3):731-735. doi: 10.1016/j.cyt.2012.07.028.
28. Reiner B, Christoph B. Modelling and remodelling of bone. In: *Bone disorders*. Cham: Springer, 2017, pp. 21-30, 1st ed. doi: 10.1007/978-3-319-29182-6_3.
29. Hwang MP, Subbiah R, Kim IG, et al. Approximating bone ECM: crosslinking directs individual and coupled osteoblast/osteoclast behavior. *Biomaterials*. 2016;103:22-32. doi: 10.1016/j.biomaterials.2016.06.052.
30. Knothe Tate ML. "Whither flows the fluid in bone?" An osteocyte's perspective. *J Biomech*. 2003;36(10):1409-1424. doi: 10.1016/s0021-9290(03)00123-4.
31. Osteocyte necrosis triggers osteoclast-mediated bone loss through macrophage-inducible C-type lectin. *PubMed*. Available online at (Accessed December 13, 2024).
32. Bratengeier C, Liszka A, Hoffman J, Bakker AD, Fahlgren A. High shear stress amplitude in combination with prolonged stimulus duration determine induction of osteoclast formation by hematopoietic progenitor cells. *FASEB J*. 2020;34:3755-72. doi: 10.1096/fj.201901458R.
33. Yu L, Ma X, Sun J, et al. Fluid shear stress induces osteoblast differentiation and arrests the cell cycle at the G0 phase via the ERK1/2 pathway. *Mol Med Rep*. 2017;16:8699-708. doi: 10.3892/mmr.2017.7720.
34. Turner CH. Site-specific skeletal effects of exercise: importance of interstitial fluid pressure. *Bone*. 1999;24(3):161-162. doi: 10.1016/s8756-3282(98)00184-7.
35. Kuchan MJ, Frangos JA. Shear-stress regulates endothelin-1 release via protein-kinase-C and cGMP in cultured endothelial-cells. *Am J Physiol*. 1993;264(1 Pt 2):150-156. doi: 10.1152/ajpheart.1993.264.1.H150.
36. Takuwa Y, Masaki T, Yamashita K. The effects of the endothelin family peptides on cultured osteoblastic cells from rat calvariae. *Biochem Biophys Res Commun*. 1990;170(3):998-1005. doi: 10.1016/0006-291x(90)90491-5.
37. Zaidi M, Alam AS, Bax BE, et al. Role of the endothelial cell in osteoclast control: new perspectives. *Bone*. 1993;14(2):97-102. doi: 10.1016/8756-3282(93)90234-2.
38. Glatt V, Evans CH, Tetsworth K. A concert between biology and biomechanics: the influence of the mechanical environment on bone healing. *Front Physiol*. 2017;7:678. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00678>.

Отримано/Received 23.09.2025

Рецензовано/Revised 01.11.2025

Прийнято до друку/Accepted 07.11.2025

Information about authors

Dmytro Bondarenko, postgraduate student of the Department of Traumatology and Orthopedics, Vinnytsia National Medical University named after M.I. Pirogov, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: dmytrobondarenko97@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8305-5899>

Yurii Bezsmertnyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Reconstructive Orthopedics and Traumatology, University Clinic of Vinnytsia National Medical University named after M.I. Pirogov, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: bezsmertnyiyurii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1388-7910002-1388-7910>

Viktor Shevchuk, MD, DSc, PhD, Professor, Deputy Director for Scientific Work, University Clinic of Vinnytsia National Medical University named after M.I. Pirogov, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: shevchukndiri@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1105-4795>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. Shevchuk V.I. — final approval of the article; Bondarenko D.V. — concept and design of the work, data collection and analysis; Bezsmertnyi Yu.O. — critical review, writing the article.

D.V. Bondarenko, Yu.O. Bezsmertnyi, V.I. Shevchuk

University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine

Remodelling of bone stumps under the influence of mechanical loading

Abstract. Background. Despite the long history of amputation surgery, issues related to the remodelling of bone tissue in stumps and the factors influencing them remain insufficiently studied. Aim: to investigate the features of bone stump remodelling and the possibilities for its optimisation in conditions of hermetic closure of the medullary cavity and mechanical loading. **Materials and methods.** Four series of experiments were conducted on 36 rabbits with amputation of the thigh in the middle third. In the first series, antagonist muscles were sutured under the bone end. In the second series, in addition to myoplasty, mechanical cyclic loading of the stump was performed with a shock wave with an energy of 0.5 mJ/mm², a frequency of 2 Hz, and 400 pulses per session. In the third series, the bone end was hermetically sealed with a cancellous graft. In the fourth series, in addition to closing the bone end with a graft, mechanical cyclic loading of the stump was performed similarly to the second series 4, 8, and 16 weeks after amputation. The observation periods were 6, 10, and 18 weeks. Histological studies were performed. **Results.** In the first series, a significant number of experiments showed pathological remodelling of bone tissue with the development of atrophy, distortion of the stump

end, its curvature, stress fractures, and osteoporosis. In the second series, the results were similar. In series III, remodelling occurred as physiological one in the short term (6 weeks), while widespread degenerative-dystrophic processes developed in the long term (18 weeks). In series IV, remodelling close to physiological one was observed at all time points. **Conclusions.** The start of mechanical loading 4 weeks after myoplastic amputation causes deepening of degenerative-dystrophic and necrotic processes and leads to pathological remodelling of bone tissue, the development of osteoporosis and stress fractures. In the absence of mechanical loading, hermetic closure of the medullary cavity allows for the formation of an organotypic cylindrical shape of the stump within 6 weeks after amputation, which can be regarded as physiological remodelling. In the long term (10–18 weeks after amputation), the absence of mechanical loading leads to remodelling disorders with the development of osteoporosis. Hermetic closure of the medullary cavity with mechanical loading on the stump allows its organotypic shape to be obtained with complete remodelling.

Keywords: bone stump remodelling; hermetic and non-hermetic closure of the medullary cavity; mechanical loading

V.V. Chorna, V.V. Petrushenko, M.V. Rybinskyi, A.V. Tomashevskyi, V.V. Kolomiets,
V.V. Poliarush, Ye.V. Tymchuk

Vinnitsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnitsia, Ukraine

Psychological resilience and mentalization of military surgeons under combat stress: a multidisciplinary approach to overcoming emotional burnout

Abstract. Background. Military surgeons work in extreme conditions where limited resources, constant time constraints, and life-threatening situations are part of everyday reality. This situation requires not only impeccable professional training, but also a high level of psychological resilience, the ability to adapt quickly, and to act effectively under pressure. The purpose of the study is to conduct a retrospective analysis of scientific sources on psychological resilience and mentalization ability in military surgeons as factors contributing to reducing the level of emotional burnout in combat stress conditions and to prove the effectiveness of a multidisciplinary approach to maintaining the mental health of medical personnel. **Materials and methods.** The study was based on an analysis of domestic and foreign scientific works using the PubMed and Google Scholar databases for 2008–2025, as well as a bibliometric, analytical, systematic, and statistical approach. The literature search was conducted using the keywords: "military surgeons", "adaptation to combat, extreme conditions", "emotional burnout", and "psychological resilience". A survey of 18 military surgeons (Role 1) was conducted to establish professional burnout syndrome using the validated diagnostic method of O. Chaban and the questionnaire "Adaptability-200". Data processing was performed using Excel and Statistica software, and statistical reliability of the results was verified using Spearman's nonparametric rank correlation coefficient. **Results.** Correlation analysis using Spearman's rank correlation coefficient revealed a statistically significant linear relationship between the questionnaire score and the age of respondents, as well as their work experience, indicating the influence of these factors on the formation of emotional burnout syndrome. The results of the study of psychological stability and adaptive potential showed the presence of the following characteristics in the study sample: 20.0 % of respondents demonstrated signs of nervous and mental instability; 40.0 % had reduced communication potential; 20.0 % exhibited reduced level of moral and ethical normativity; 20.0 % reported a low level of military and professional focus; 20.0 % had pronounced deviant behavioral traits; 20.0 % showed markers of increased risk of suicidal behavior. The data obtained indicate the need for systematic psychological support for personnel and the implementation of targeted correctional and rehabilitation programs within the military medical environment. **Conclusions.** Preserving the human resources of military medicine, particularly surgeons, is a strategic task for Ukraine's defense system. The effectiveness of medical care in combat zones is largely determined by the professional training and psychological resilience of personnel working in high-risk conditions with limited resources.

Keywords: military surgeons; emotional burnout; psychological resilience; adaptation to combat and extreme conditions; resource scarcity; multidisciplinary approach; mentalization

Introduction

Modern armed conflicts, in particular the full-scale war in Ukraine, have placed new demands on the professional activities of military medics, especially surgeons working in combat zones. Military surgeons operate in conditions of increased risk, limited time, lack of resources, and constant threat to life, which requires not only a high level of professional skill, but also the ability to adapt psychologically and manage stress [1].

The issue of medical personnel adaptation to extreme conditions has become particularly important in light of the armed conflicts of recent decades. Studies show that military surgeons are regularly exposed to stressors such as mass casualties, resource constraints, emotional exhaustion, and traumatic events, which contribute to the development of post-traumatic stress disorder (PTSD), burnout, and professional maladjustment [2, 3].

At the same time, highly developed professional skills, algorithms for action in critical situations, and a system of psychological support help reduce the negative impact of combat stress on the effectiveness of military surgeons [4].

Building resilience and developing self-regulation skills are key factors in maintaining the combat readiness of medical personnel in wartime [5].

Thus, research into the psychophysiological, professional, and organizational aspects of military surgeons' activities in combat conditions is extremely relevant for improving the effectiveness of medical care and preserving the health of the medical personnel.

The purpose of the study is to conduct a retrospective analysis of scientific sources on psychological resilience and mentalization ability in military surgeons as factors contributing to reducing the level of emotional burnout in combat stress conditions and to substantiate the effectiveness of a multidisciplinary approach to maintaining the mental health of medical personnel.

Materials and methods

The study was based on an analysis of domestic and foreign scientific works using the PubMed and Google Scholar databases for 2008–2025, as well as a bibliometric, analytical, systematic, and statistical approach. The literature search was conducted using the keywords: “military surgeons”, “adaptation to combat, extreme conditions”, “emotional burnout”, and “psychological resilience”. A survey of 18 military surgeons (Role 1) was conducted to establish professional burnout syndrome using the validated diagnostic method of O. Chaban and the questionnaire “Adaptability-200”. Data processing was performed using Excel and Statistica software, and the statistical reliability of the results was verified using Spearman's nonparametric rank correlation coefficient.

Results

Based on the results of a survey of military surgeons who served in combat zone and provided surgical care in conditions of resource scarcity, an assessment was made of their level of professional burnout [6] and degree of adaptation to extreme professional stress [7].

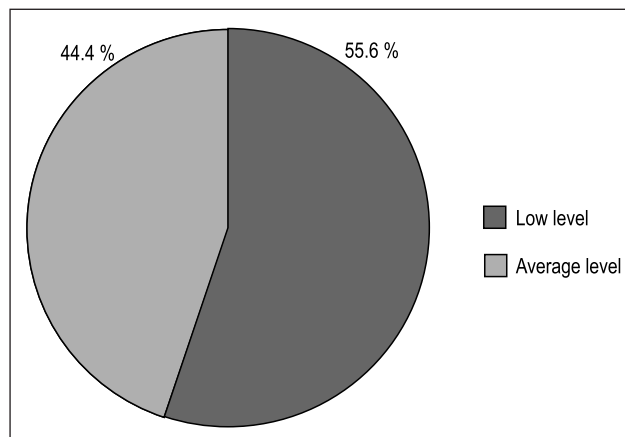


Figure 1. Levels of occupational burnout risk among military surgeons

The assessment was carried out using a standardized psychodiagnostic questionnaire that provides an integrated quantitative indicator of professional burnout syndrome in the range from 0 to 87 points. A higher total score is considered as a higher level of burnout symptoms.

In order to interpret and summarize the results, the values obtained were conditionally divided into risk levels according to the specified ranges (Fig. 1):

1. A low risk of developing professional burnout syndrome (0–29 points) indicates minimal emotional and physical exhaustion, as well as a high ability to adapt to professional stress. Ten respondents (55.6 %) who are military surgeons were included in this category. Their individual scores ranged from 24 to 29 points, demonstrating the presence of adequate mechanisms of psychological stability and effective adaptation to the extreme conditions of professional activity.

2. The average risk level (30–59 points) reflects the presence of moderate psycho-emotional stress (pre-illness), which, although not reaching a clinically significant level, indicates potential threats to the psycho-emotional state and the need for psychoprophylactic measures. Eight respondents (44.4 %) fell into this group. In most of them (6 people), the level of burnout was at the lower end of the average range — from 30 to 32 points (75.0 %).

The data of two surgeons who showed the highest scores among the entire sample — 40 points each (25.0 %) — deserve special attention. These results may indicate pronounced psycho-emotional tension (signs of illness), which is already close to a high risk of developing burnout syndrome, which may be the result of:

- intense and prolonged exposure to combat stress factors;
- a high level of responsibility for the lives of the wounded in conditions of limited resources;
- significant professional experience with accumulated experience in critical situations;
- overwork due to staff shortages, which is especially common during wartime.

All respondents show signs of burnout. The overall average score was 27.50 ± 14.12 , with a margin of error of 3.33.

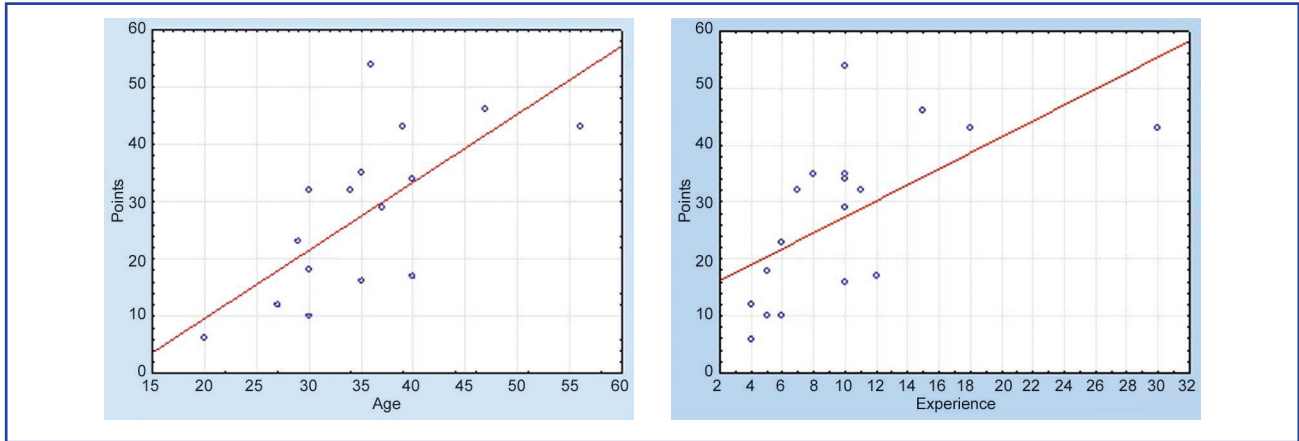


Figure 2. Correlation analysis according to Spearman's rank correlation coefficient for the formation of professional burnout syndrome

The minimum score was 6, and the maximum score was 54. Considering the number of questions related to each factor, the most influential symptoms were professional dissatisfaction (6.17 ± 4.90), emotional and volitional symptoms (5.56 ± 3.55), symptoms of fatigue and feeling of lack of time (3.33 ± 1.28), depersonalization and derealization (3.5 ± 3.0) (Table 1).

Table 1. Factor analysis of professional burnout among military surgeons (points)

Symptoms	M $\pm$ m
Symptoms of professional dissatisfaction	6.17 ± 4.90
Emotional and volitional symptoms	5.56 ± 3.55
Symptoms of fatigue and feeling of lack of time	3.33 ± 1.28
Symptoms of depersonalization and derealization	3.5 ± 3.0
Asthenic-depressive symptoms	2.28 ± 2.05
Symptoms of anxiety	1.89 ± 1.23
Symptoms of the need for solitude and withdrawal from people	2.22 ± 1.48
Symptoms of dissatisfaction with monetary compensation	1.61 ± 1.79
Symptoms of the desire for rest	1.17 ± 0.79
Symptoms of positive moral attitudes toward dedication to work	0.28 ± 1.18

Correlation analysis according to Spearman's rank coefficient revealed a clear linear dependence of the questionnaire score on the age of respondents and their work experience in terms of developing emotional burnout syndrome: the correlation coefficient r_s was 0.69 and 0.71 for age and work experience, respectively ($p < 0.05$) (Fig. 2, 3).

The influence of respondents' age and work experience on the quantitative assessment of the questionnaire, and thus the chances of developing burnout syndrome is demonstrated visually using a wafer plot diagram (Fig. 3).

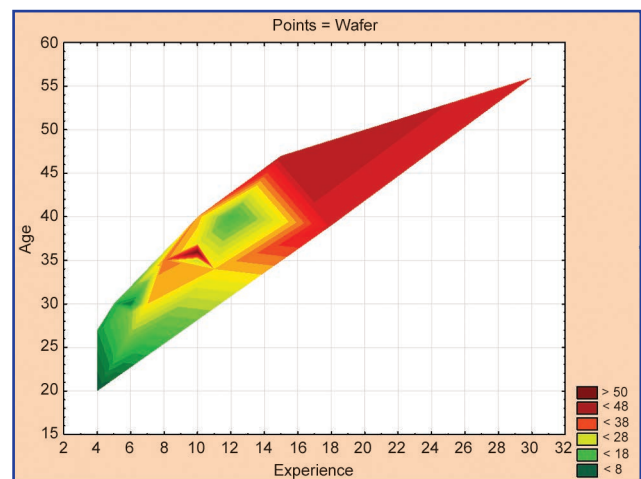


Figure 3. Visual demonstration of the influence of age and experience of military surgeons on the development of professional burnout syndrome

The research data shows that a significant proportion of respondents are in a state of chronic emotional exhaustion, although a critical level requiring immediate clinical intervention has not yet been reached. At the same time, the trend toward increasing burnout is evident and requires preventive attention from military medical and psychological services.

These factors are typical for military surgeons who work in an extremely stressful environment, where constant tension, rapid decision-making on matters of life and death, and a lack of time and resources create extremely high psychological pressure. In addition, constant contact with traumatized military personnel, difficult clinical cases, moral dilemmas, and emotional involvement significantly reduce internal reserves of adaptation.

The results of the study confirm that the specificity of the professional activity of military surgeons is a combination of high professional responsibility, the need to make quick decisions in conditions of uncertainty, and physical

and emotional overload. The combination of these factors objectively increases the risk of professional burnout even in experienced specialists.

To assess the level of psychological stability and personal adaptation potential of military surgeons who provided surgical care in the combat zone, it was proposed to conduct a survey using the multilevel personal questionnaire "Adaptability-200" [7].

The professional activity of military surgeons is characterized by a high degree of psycho-emotional stress and the need to make quick decisions in critical situations, accompanied by significant responsibility for the lives and health of the wounded. In such conditions, the assessment of the adaptive resources and psychological stability of specialists becomes particularly important.

An analysis of the reliability scale of responses revealed that 20.0 % of surgeons demonstrated a high level of objectivity and sincerity in their responses, indicating adequate self-perception and openness. A total of 40.0 % of the study participants showed a generally sufficient level of sincerity, but with signs of social desirability, which may indicate a certain correction of responses in the direction of socially acceptable attitudes. For the remaining 40.0 % of respondents, the results need to be interpreted with caution due to a pronounced desire to demonstrate socially acceptable behavior, which may significantly affect the reliability of the data obtained (Fig. 4).

The study found that the average behavioral regulation score was 46.9 points, indicating a generally sufficient level of regulatory mechanisms for adaptive behavior among military surgeons. In 60.0 % of respondents, an average and sufficient level of neuropsychic stability was established, which ensures the preservation of professional effectiveness even under conditions of intense psycho-emotional stress. These surgeons are able to maintain self-control, make informed decisions, and maintain optimal performance in stressful situations, which is especially important for effective functioning in a combat zone (Role 1).

20.0 % of the respondents showed a high level of tolerance to stress factors, which is extremely valuable in professional activities related to surgical interventions in combat conditions, where uncertainty, risk, and physical overload are dominant factors. Such specialists, as a rule, demonstrate high emotional self-regulation, the ability to mobilize resources in critical circumstances, and rapid adaptation to a changing external environment.

At the same time, 20.0 % of participants showed signs of behavioral and neuropsychiatric instability, manifested in reduced stress tolerance, rapid exhaustion, and difficulties in adapting to new or complex conditions. In such cases, adaptation processes may be dysfunctional, potentially posing the risk of impaired professional performance and the development of psychological maladjustment, especially in conditions of chronic or combat stress.

According to the questionnaire, the communicative potential of military surgeons averaged 14.8 points, which corresponds to the overall average level of communicative competence development. 40 % of respondents demonstrated a sufficient level of communication skills, allow-

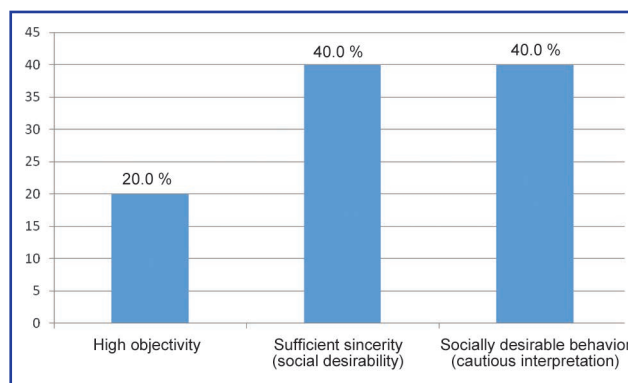


Figure 4. Analysis of the reliability scale among military surgeons

ing them to interact effectively with colleagues, coordinate team actions, and engage in constructive professional communication under pressure and time constraints.

20.0 % of military surgeons had a high level of communicative flexibility, the ability to easily establish interpersonal contacts, maintain a positive psychological climate in the team, and respond adequately to social stimuli. This contributes to stable interpersonal relationships and effective teamwork under stressful conditions.

At the same time, 40.0 % of respondents demonstrated a reduced level of communicative potential, which may indicate difficulties in building interpersonal relationships, low flexibility in communication, and limited ability to interact openly. Such characteristics may complicate effective professional activity in a team, reduce the level of social support, and affect adaptation in extreme conditions. At the same time, in most cases, reduced communicativeness was not accompanied by pronounced maladjustment, and participants demonstrated the ability to respond adequately to constructive criticism and partially self-correct their behavior.

Moral and ethical normativity as a component of personal adaptation potential averaged 10.2 points in the sample, of respondents, which corresponds to the average level of socialization and moral orientation. In 60.0 % of military surgeons, a sufficient level of moral normativity can be observed, which manifests itself in an orientation towards socially acceptable patterns of behavior, adherence to ethical standards of professional activity, and discipline. Such specialists are able to function effectively within the social norms and requirements of military service.

20.0 % of participants demonstrated a high level of moral and ethical normativity, indicating internal integration of moral values, willingness to subordinate personal interests to group (team) needs, a high level of responsibility, and motivation to adhere to professional ethical standards.

At the same time, 20.0 % of respondents showed a reduced level of socialization, characterized by the dominance of personal interests over collective ones, a lower willingness to submit to group (team) norms, and a potential tendency toward individualistic or non-conformist behavior patterns. This can complicate the process of social adaptation and interaction in the context of the rigid organizational structure

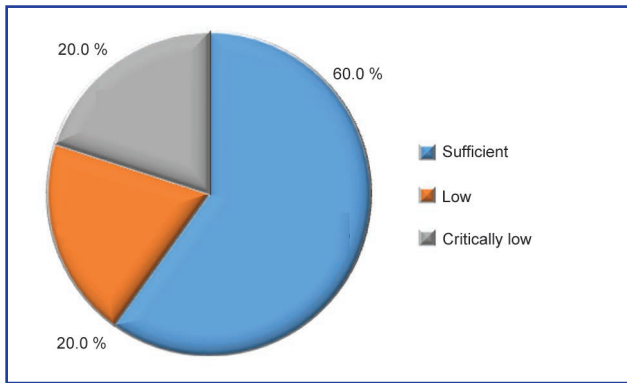


Figure 5. Level of combat stress resilience among military surgeons

of military service, especially in situations that require clear team coordination.

Additional indicators of the psychological functioning of military surgeons were determined:

1. Military-professional orientation.

The average score on the military-professional orientation scale was 16.5, which indicates a predominantly sufficient level of professional motivation among the respondents. 80.0 % of surgeons showed a pronounced orientation toward professional activity, manifested itself in a positive attitude toward military service, an understanding of its significance, and a willingness to continue professional careers in conditions of increasing demands and risks. These participants demonstrate a formed professional identity and internal motivation to realize themselves within chosen profession.

At the same time, 20.0 % of military surgeons showed a low level of military-professional orientation, which may indicate insufficient satisfaction with professional activities, doubts about further stay in the military medical system, as well as the risk of professional burnout. In some cases, there is a tendency to distance from one's professional role, which is a critical factor in the formation of adaptation difficulties in the future.

Therefore, attention should be paid to measures to support professional motivation and prevent emotional exhaustion, in particular through the implementation of psychological support programs, professional mentoring, and corrective work with respondents who show signs of professional maladjustment.

2. Tendency to deviant behavior.

The average score on the scale of propensity for deviant behavior was 16.8 points. 60.0 % of respondents showed no signs of deviant behavior, indicating stable social norms and values, a high level of self-control, and constructive strategies for interpersonal interaction. These individuals demonstrate socially acceptable behavior and a low likelihood of destructive reactions in critical situations.

However, 20.0 % of military surgeons had isolated manifestations of aggression, impulsivity, or reduced self-control in their social behavior. Such signs may be a reaction to chronic psycho-emotional stress, professional stress, or maladjustment. Another 20.0 % of respondents

showed pronounced deviant traits, potentially indicating a risk of inappropriate responses in frustrating situations, a tendency to violate social norms, aggressive and confrontational behavior, and difficulties in establishing effective communication.

These results justify the need for in-depth psychological diagnosis and individual corrective work aimed at preventing deviant behavior and forming socially adaptive behavior patterns in military service.

3. Level of suicide risk.

The average score on the suicide risk scale was 8.9 points, which corresponds to a low level of threat of suicidal behavior among most participants. In 80.0 % of surgeons, there are no pronounced signs of destructive tendencies or manifestations of emotional maladjustment associated with suicidal intentions. These military personnel are usually characterized by a stable emotional background, the presence of a supportive social environment, and adaptive mechanisms for overcoming difficulties.

However, 20.0 % of respondents showed individual markers of increased suicide risk, including signs of interpersonal isolation, emotional exhaustion, difficulties in regulating stress, or low self-esteem. Although these manifestations are not critical, they can become relevant in crisis situations, particularly in conditions of combat stress, loss, or physical exhaustion. In such cases, the risk of transitioning to destructive forms of behavior increases.

These data indicate the advisability of organizing systematic psychological monitoring and individual support for military personnel who show signs of emotional instability, with the aim of early prevention of crisis situations and potential suicidal actions.

According to the results of the study, the average level of combat stress resistance among the military surgeons surveyed was 71.93 points, which corresponds to a satisfactory level (level 3) according to the criteria for assessing this parameter. This indicates the general ability of most respondents to maintain functional mental stability under the influence of combat and extreme factors, the effectiveness of professional activities in conditions of increased risk and emotional stress.

60.0 % of military surgeons were found to have a sufficient level of resistance to combat stress, which indicates the presence of established adaptation mechanisms, a high degree of personal maturity, the ability to regulate emotions, and to mobilize internal resources in combat conditions. Such specialists are able to effectively perform professional tasks in life-threatening conditions, high uncertainty, and information overload. They maintain critical thinking, quick decision-making, and adequate behavioral responses in complex situations.

20.0 % of respondents demonstrated low resistance to combat stress, indicating a barely acceptable level of adaptability that only partially meets the requirements of military activity in critical circumstances. Such individuals may experience periodic signs of maladjustment: emotional instability, sleep disturbances, decreased concentration, and difficulty making decisions in uncertain situations. These manifestations are usually not systemic, but with further

exposure to stressors, they can lead to the development of acute or chronic stress reactions.

The most vulnerable group was another 20.0 % of military surgeons who were found to have critically low levels of resistance to combat stress. In such cases, there are clear signs of nervous and mental instability, emotional exhaustion, increased sensitivity to frustration factors, and an inability to mobilize internal resources in difficult circumstances. These respondents are characterized by a reduced threshold of psycho-emotional endurance, which significantly complicates adaptation to combat conditions and may pose a threat to professional effectiveness in extreme situations (Fig. 5).

Discussion

A study by M. Ryu (2023) conducted among United States military surgeons who participated in combat operations in Afghanistan and Iraq during periods of intense combat losses found that 80.0 % of respondents were male. According to the results, 55.0 % of respondents provided surgical care during combat operations in Afghanistan, 45.0 % in Iraq, with 15.0 % of military surgeons having experience in both countries.

The study demonstrated high levels of psychological and emotional burnout associated with performing professional duties in resource-limited conditions according to medical protocols. The main factors contributing to emotional burnout were the effects of emotional stress caused by providing care to the seriously wounded, particularly in cases of multiple and combined injuries among American military personnel. Additional negative effects on the psychological state of medical personnel were caused by difficulties related to limited access to specialized care, lack of practical experience in performing certain surgical procedures, and problems in communication with the military command.

The consequences of psychological and emotional burnout manifested themselves in sleep disturbances, increased irritability, and difficulties in establishing and maintaining interpersonal relationships [8].

According to the results of a study by D.M. Modlin (2020) conducted among military surgeons, 64.0 % of respondents were men, 65.0 % were married, and 40.0 % had children. The overall level of professional burnout reached 66.0 %.

Analysis of open-ended responses showed that the main stress factor for survey participants was excessive workload due to non-clinical and administrative duties. At the same time, the most pronounced protective factor against burnout was support from colleagues. These data emphasize the need to optimize the organization of the work process and create a favorable professional environment, which are important measures for the prevention of emotional burnout among military surgeons [9].

A systematic review by A. Tam (2025) found that acute stress has a significant negative impact on the technical and non-technical skills of surgeons, both in simulation training and real clinical situations. Stress factors lead to an increase in the frequency of errors, prolongation of the duration of surgical interventions, impaired visual-motor coordination, and reduced teamwork efficiency. The main mechanisms of

this effect are cognitive overload and decreased motor accuracy, which in turn reduces the effectiveness of surgical procedures.

At the same time, experienced surgeons demonstrate a higher level of stress resistance, which is due to the automation of professional skills that allow them to maintain control and accuracy even under the influence of stress factors. It has been found that the introduction of mental practice techniques, stress management, and simulation training helps reduce the negative impact of stress on surgical activity [10].

According to a study by M. Jones (2008), during combat operations in Iraq, medical personnel of the British Armed Forces demonstrated a higher incidence of psycho-emotional disorders compared to military personnel of other specialties. Among medical personnel, 70.0 % reported psychological distress, 65.0 % had multiple somatic symptoms, and 60.0 % reported increased fatigue, particularly among men. At the same time, female medical personnel complained of fatigue less often than men (44.0 %).

The level of PTSD among medical personnel was not significantly related to the performance of professional duties, although 18.0 % of participants reported symptoms of PTSD, and 15.0 % reported alcohol abuse as a means of coping with psychological and emotional stress.

Psychological difficulties among medical personnel were largely due to low team cohesion (43.0 %), a high degree of traumatic experience (55.0 %), and difficulties in adapting after returning from the combat zone (50.0 %) [11].

According to a retrospective analysis by P. Cawkill (2015), among medical personnel of the British Armed Forces who served in combat zones in Iraq and Afghanistan, the prevalence of mental disorders such as psychological distress, PTSD, somatic symptoms, and alcohol abuse was 24.0 %, but when compared to rear located medics, the frequency of PTSD symptoms was 18.0 %. This result may be due to several factors, including the intensity of combat experience, the involvement of medical personnel in tasks that exceeded their professional skills and training, and the more difficult experience of psychological adaptation after returning from combat zones. Moreover, rear located medics more often reported feeling overwhelmed while performing their duties (60.0 vs. 45.0 % among frontline medics) and difficulties associated with returning to civilian life (53.0 vs. 39.0 %), which indicates an increased level of emotional exhaustion and vulnerability to the development of mental disorders among this category of military personnel and shows high stress resistance among military medics who served in combat zones [12].

The results of a study by A. Adler (2017) among US Armed Forces medical personnel involved in combat deployments in Afghanistan showed a high level of professional burnout. A survey conducted among military medics showed that 63.0 % of respondents reported high levels of emotional exhaustion and 55.0 % reported depersonalization, which are the main components of burnout. These indicators were closely correlated with high levels of perceived professional stressors.

The protective factors associated with lower levels of burnout were behavior focused on caring for one's own

well-being — 38.0 %, support within the team (team care) — 45.0 %, and effective leadership, particularly with an emphasis on promoting the psychosocial health of personnel — 57.0 %. These factors reduced the level of emotional burnout regardless of military rank, the presence of PTSD symptoms, and overall stress levels.

Of particular note is the impact of health-oriented leadership, which had an independent positive effect. Approximately 65.0 % of respondents who worked under such leaders reported a significant reduction in emotional burnout and improved psychosocial health [13].

A study by J. Trope (2025) conducted among active-duty military orthopedic surgeons in the United States found emotional and professional burnout syndrome in 33.0 % of them. Among residents, this figure was significantly higher — 49.0 % compared to 26.0 % among senior physicians. Men predominated in the sample (82.0 %), while women accounted for only 18.0 %.

Analysis of the data showed that support from colleagues and management, as well as an optimal workload had a significant protective effect against the development of burnout syndrome. In particular, low levels of personal achievement were more common among general practitioners, while the likelihood of burnout was significantly lower among residents.

Regarding satisfaction with military service, only 50.0 % of doctors and 70.0 % of residents said they would choose a military career again, while 93.0 % of doctors and 86.0 % of residents confirmed their choice of orthopedics as a specialty [14].

The study conducted by V. Garbuzova (2024) was aimed at examining the psycho-emotional state of medical personnel at treatment and rehabilitation facilities for combatants involved in providing medical care in the context of full-scale aggression in Ukraine. It focuses on the impact of secondary traumatization and high levels of professional stress, which negatively affect the quality of medical services and the overall health of employees.

The results of the study showed that medical workers generally have an average level of resilience, with women showing slightly lower scores than men. According to the data for the subscales “perceived support”, “professional burnout”, “secondary traumatic stress”, and “moral distress”, these indicators are at a moderate level. At the same time, the group of nurses had a significant decrease in the feeling of support, accompanied by an increase in the level of secondary traumatization, burnout, and moral suffering. Doctors show high levels of satisfaction with compassion, while nurses and other workers have average values, with the lowest scores among nurses.

Data analysis confirmed that higher resilience is associated with greater satisfaction from compassion and better perception of support, while low resilience is a factor that increases the risk of professional burnout, secondary traumatization, and moral suffering. Thus, nurses are the most vulnerable category among medical personnel, prone to the development of professional burnout and secondary traumatization, which requires special attention to ensure their psycho-emotional support and prevention of mental disorders [15].

The ability of military surgeons to adapt to stressful factors is determined by the level of their adaptive resources, which include not only physical endurance, but also psychological readiness to work in conditions of increased risk, time constraints, and emotional pressure, which are characteristic of military field conditions. High adaptive abilities contribute to effective functioning in chronic stress inherent in combat or emergency situations.

A military surgeon is a specialist who combines general clinical competencies with the skills necessary for effective surgical care in combat conditions. Unlike civilian surgeons, their professional activity is characterized by the constant need to adapt to combat and extreme conditions, accompanied by significant logistical, organizational, and clinical limitations [16, 17].

One of the key challenges faced by a military surgeon is a shortage of resources: limited qualified personnel, lack of adequate technical support, and a shortage of medical supplies. In such conditions, surgeons are forced to make clinical decisions based on the available equipment, often improvising to preserve the viability of patients [18].

In addition, operating in remote or isolated combat zones without developed healthcare infrastructure complicates medical triage, evacuation of the wounded, and organization of postoperative care. It is particularly important for military surgeons to be able to stabilize patients' conditions until they can be evacuated to a hospital. A study by R.S. Kotwal (2018) analyzed the activities of military surgeons in Role 2 medical facilities of the US Armed Forces located in Afghanistan. According to the data obtained, among all fatal cases, 40.0 % of patients were in critical condition, 11.2 % were in serious condition, 0.8 % were in moderate condition, and less than 0.1 % were in mild condition.

Most deaths at the prehospital stage were classified as critical (66.3 %) or severe (25.9 %). At the same time, among the survivors, patients with mild (56.9 %) or moderate (25.4 %) severity of injuries prevailed.

Overall, 14.0 % of fatalities occurred during the pre-hospital phase: 5.8 % before transport and 8.2 % during transport. The remaining 86.0 % of deaths occurred in Role 2 medical facilities after evacuation.

Among fatalities for which the time of transport was documented, the median was 53.0 minutes. Meanwhile, most patients (61.7 %) were evacuated within 60 minutes after injury [19].

The specific nature of combat trauma also places an additional burden on military surgeons. In particular, combined mine-blast, gunshot, and burn injuries require a multidisciplinary approach and rapid decision-making [20]. Such injuries are often accompanied by massive bleeding, damage to large vessels, abdominal organs, the chest, or the central nervous system, which significantly complicates surgical tactics [21, 22].

The professional activities of a military surgeon in combat conditions are extremely complex and require a combination of a high level of clinical competence, adaptability to extreme circumstances, and crisis management skills. The effective functioning of military surgeons is a critical factor in reducing mortality among the wounded in combat conditions.

A study by A. Ramasamy (2010) analyzed the distribution of surgical interventions by specialty in military conditions. According to the results, orthopedic operations had the largest share — 66.0 %, while general surgical interventions accounted for 21.0 %, head and neck operations — 6.0 %, burn operations — 5.0 %, and other interventions — 4.0 %. The author also notes that the surgical workload nearly doubled during the second year of combat operations compared to the first year of the armed conflict in Afghanistan.

A. Ramasamy found that the nature of the injuries and the range of surgical skills required far exceed those typically used in clinical practice in the UK National Health Service. In this regard, various strategies are proposed for the training of future military surgeons. These include sending trainee doctors to military hospitals and introducing more targeted courses in military surgery tailored to the needs of combat conditions [23].

In a study by O. Barbier (2018), a retrospective analysis of the surgical activities of orthopedic surgeons during three large-scale French military operations (Afghanistan, Mali, Central African Republic) was conducted. The volume of surgical interventions, the nature of injuries, the status of patients, and the indications for surgery were assessed. The results of the study revealed significant variability in the volume of operations, the spectrum of pathologies, and the types of patients, which depended on the conditions of deployment of medical units.

In particular, at Role 3 medical facilities, most of the surgical activity was planned interventions, while in advanced Role 2 facilities (Mali, Central African Republic), more than 70.0 % of operations were emergency procedures. Indications for surgical interventions ranged from emergency trauma care to reconstructive limb surgery and included non-orthopedic procedures such as vascular repair and decompressive craniotomy.

O. Barbier emphasizes that the significant diversity and high level of technical complexity of the interventions performed require the training of versatile military orthopedic surgeons capable of working at the intersection of orthopedics, neurosurgery, general, and vascular surgery. This approach to training military medics has proven its relevance and effectiveness in the context of real clinical challenges arising in modern armed conflicts, ensuring the development of the competencies necessary for effective work in extreme conditions [24].

A study conducted by K. Gomes (2024) provided a comprehensive analysis of the relationship between stressors associated with military deployment, affective state, and symptoms of behavioral health disorders among United States military medical personnel who participated in combat operations. Respondents were assessed on criteria such as symptoms of PTSD, level of combat and military exposure, intensity of stress, and specific emotional state.

According to the study results, most participants (89.0 %) had a predominantly positive military experience, but a significant proportion of them encountered potentially traumatic situations. In particular, 47.0 % reported witnessing dead or seriously wounded military personnel, and 21.0 % demonstrated clinically significant symptoms of PTSD.

The assessment of risk factors such as combat experience, stress levels, and PTSD symptoms explained 39.0 % of the variation in negative affect among respondents. At the same time, for positive affect, these factors, together with indicators of overall military experience and psychological resilience, accounted for 28.0 %.

No significant differences were found between male and female medical personnel in terms of the impact of the factors studied on the development of positive and negative affect. The researchers emphasize that the pronounced negative emotional reaction in a significant proportion of military medical personnel may be a consequence of PTSD, which, with appropriate rehabilitation programs, can be effectively treated even in a combat zone. Social support plays a special role in maintaining emotional stability during military missions, correlating with positive changes in the affective state of medical personnel [25].

A study by A.L. Peterson (2019) found that 18.0 % of military medical personnel reported a significant impact of combat operations on their emotional and mental state. At the same time, more than three times as many respondents (67.0 %) noted that their condition was significantly affected by medical-specific stress factors associated with the performance of professional duties in combat conditions.

Approximately one in ten military medics tested positive for PTSD, and about one in twenty had a diagnosis confirmed by strict diagnostic criteria. Further analysis showed that both the intensity of medical stressors and combat factors were statistically significantly associated with the severity of PTSD symptoms. At the same time, the impact of medical stressors showed a stronger association with the development of PTSD than combat ones, and this trend persisted under both minimal and strict diagnostic criteria. The results indicate that although combat stressors remain a significant risk factor in military medical personnel, they are more likely to experience intense psychological stress associated with the treatment of severely injured patients, particularly those with amputations, severe burns, and gaping wounds. This leads to an increased risk of developing clinically significant PTSD in 5.0–10.0 % of military medics, even with the availability of prevention and treatment programs designed primarily for combat units [26].

The results reported by C. Leners (2014) indicate high levels of psychological resilience among all military surgeons surveyed who participated in providing medical care in combat conditions. In particular, a significant relationship was found between components of professional quality of life (job satisfaction, emotional exhaustion, level of compassionate stress) and the level of psychological resilience. Significant differences in professional quality of life were found depending on combat experience, indicating the important influence of this factor on the psychological state and professional well-being of military doctors. The researcher emphasizes the need to pay special attention to supporting the psychological resilience of military surgeons, which is an important factor in their readiness to perform complex tasks in combat zones. Timely identification and support of the psychological resilience of military doctors significantly increases the effectiveness and readiness of

military medical units, which remains one of the main challenges for the Ministry of Defense [27].

In military medicine, especially in combat situations, mentalization — the ability to understand both one's own behavior and the behavior of others through the prism of mental states such as emotions, desires, beliefs, and intentions — is critical to effective communication and mutual understanding between medical personnel and patients who are often traumatized both physically and psychologically [28, 29].

For military surgeons working in extremely stressful, risky, and unpredictable combat conditions, the ability to mentalize becomes an important tool for maintaining psychosocial relationships with patients and colleagues. Studies show that high levels of mentalization ability among healthcare professionals are associated with better therapeutic outcomes, lower levels of emotional burnout, and a more stable attachment style [30].

In the context of combat conditions, it also helps maintain morale, prevent isolation, and support team (multidisciplinary) effectiveness [31].

In addition, developing mentalization skills in military surgeons can reduce the risk of professional deformation, strengthen emotional regulation in critical situations, and promote more effective clinical decision-making, even in conditions of informational uncertainty [32].

A study by C. Choufani (2021) indicates that mastering the skills necessary for military surgery often exceeds the capabilities of standard civilian medical training, especially in conditions of limited resources and complex combat situations. One of the most effective ways to gain such experience is to participate in internships that are specifically adapted to the operational conditions of future missions.

C. Choufani (2021) conducted a survey among military surgeons who underwent internships during their initial professional training. Most respondents (88.4 %) indicated that the internship significantly increased their operational readiness to provide medical care in combat situations, with 83.6 % rating this impact as significant. In addition, 88.4 % of participants supported the idea of introducing this format as a mandatory part of the training of future military surgeons.

The results obtained demonstrate the importance of continuous training for the development of both clinical and technical skills, as well as for familiarization with the organizational aspects of working in field hospitals, the specifics of the contingent, and the nature of injuries that occur in combat conditions. This training format is a highly effective tool for developing the competencies of military surgeons and provides invaluable experience that cannot be replicated in standard medical practice [33].

According to data from S. Korol (2023), since 1993, more than 3,000 surgeons and more than 7,000 medical specialists from the Ministry of Defense medical facilities have been trained within the framework of the Armed Forces of Ukraine's medical service training system, of which 20.0 % have undergone training in the form of field cycles. The Department of Military Surgery at the Ukrainian Military Medical Academy (Kyiv) regularly organizes courses and

training sessions with international participation, involving specialists from Ukraine's partner countries. In particular, specialized events are held such as Current Issues in Combat Surgical Trauma, aimed at training surgeons from military mobile hospitals and advanced surgical teams.

These programs focus on mastering modern high-tech and minimally invasive methods of diagnosis and treatment: endoscopy, laparoscopy, ultrasound technologies, interventional sonography, radiology, spiral computed tomography, and magnetic resonance imaging. The goal of these activities is to improve the quality of surgical care for combat injuries and to ensure the standardization of medical protocols and standards in the context of military conflicts [34].

According to J. Shumaker (2024), the Operation Gunpowder simulation program provided targeted training for Ukrainian medical professionals to provide care in armed conflict situations with limited resources. During the program, three main obstacles to the effective work of Ukrainian military medicine were identified: limited resources, logistical problems, and time constraints. In particular, Ukrainian medics are forced to keep patients and provide them with vital assistance for long periods, which can last from several hours to several days due to prolonged combat operations and the constant threat from enemy drones.

Evacuation delays contribute to situations where medical professionals must provide treatment outside of standard CLS (systemic flightworthiness) protocols, particularly to maintain patient stability. As a result, Ukrainian medical professionals have acquired the necessary knowledge and skills to stabilize patients, particularly in critical areas such as hemodynamic monitoring, sepsis treatment, and respiratory control. At the same time, they have learned to effectively distribute scarce medicines and work as a team, performing important functions within the medical service.

Ukrainian military surgeons mastered a number of key skills, including optimizing patient management in complex operational and tactical situations, developing leadership competencies, and improving interdisciplinary teamwork. All these skills are aimed at improving the effectiveness of medical care in combat conditions, which are characterized by time constraints, limited resources, and a large number of wounded. Researchers emphasize the importance of international cooperation and the use of simulation technologies as a key element in improving military medical training, highlighting their effectiveness in developing the robust clinical and organizational skills necessary for effective work in crisis situations [35].

The practical significance of the data obtained lies in the need to develop and implement targeted psychological support programs, in particular:

- regular psychodiagnostic assessment of military surgeons and all medical personnel;
- organizing regular monitoring of the psycho-emotional state, especially for individuals with low or critically low levels of psychological resilience;
- conducting supervision and psychological relief groups after staying in a combat zone;

— implementing psychological training programs aimed at developing stress resistance and increasing the adaptive potential of military medics;

— involving specialists in military and crisis psychology in psychoprophylactic and corrective work;

— conducting training on the development of self-regulation, relaxation, crisis response, and effective communication skills in stressful conditions.

Considering the level of resistance to combat stress is key when making decisions about assigning personnel to high-risk positions, as well as when planning measures to preserve the mental health of military personnel.

Conclusions

1. Preserving the human resources potential of military medicine, particularly surgeons, is a strategic task for Ukraine's defense system. The effectiveness of medical care in combat zones is largely determined by the professional training and psychological resilience of personnel working in high-risk conditions with limited resources.

2. Correlation analysis according to Spearman's rank coefficient revealed a clear linear dependence of the questionnaire score on the age of respondents and their work experience on the formation of emotional burnout syndrome.

3. The study of psychological resilience and adaptive potential showed that 20.0 % of participants have signs of nervous and mental instability, 40.0 % reported a reduced level of communicative potential, 20.0 % exhibited a reduced level of moral and ethical normativity, 20.0 % have a low level of military-professional orientation, 20.0 % reported pronounced deviant behavioral traits, 20.0 % have markers of increased suicidal risk, indicating the need for targeted psychological support and the implementation of correctional programs in the military-medical environment.

4. The development of international cooperation and the introduction of simulation technologies in the training of military medics is a promising direction for improving readiness for action in extreme conditions. Such approaches allow for the formation and improvement of clinical thinking, rapid decision-making, and interaction skills in stressful situations.

Prospects for further research. It is planned to continue research in this area aimed at studying the real impact of stress on military medics and personnel and to develop preventive measures.

References

1. Wang L, Cai Y, Zhao J, et al. Psychological stress and physiological outcomes: investigating the impact of attention biases and emotional regulation in Chinese military service members. *BMC Public Health*. 2025 Oct;25(1):3589. doi: 10.1186/s12889-025-23924-5.
2. Doody CB, Robertson L, Cox KM, Bogue J, Egan J, Sarma KM. Pre-deployment programmes for building resilience in military and frontline emergency service personnel. *Cochrane Database Syst Rev*. 2021 Dec 6;12(12):CD013242. doi: 10.1002/14651858.CD013242.pub2.
3. Legesse AY, Hadush Z, Teka H, et al. Lived experience of healthcare providers amidst war and siege: a phenomenological study of Ayder Comprehensive Specialized Hospital of Tigray, Northern Ethiopia. *BMC Health Serv Res*. 2024 Mar 6;24(1):292. doi: 10.1186/s12913-024-10655-3.
4. McClung JP, Beckner ME, Farina EK. Assessing the physiological basis for resilience in military personnel. *Stress Health*. 2023 Sep;39(S1):33-39. doi: 10.1002/smi.3271.
5. Daffey-Moore E. Why is building psychological resilience relevant to UK Service personnel in order to improve military mental health? *BMJ Mil Health*. 2020 Apr;166(2):89-94. doi: 10.1136/jramc-2018-000962.
6. Chaban O, Khaustova O, Omelyanovich V. Questionnaire for identifying professional burnout syndrome: development and validation of a new diagnostic method. *Psychosomatic Medicine and General Practice*. 2025;10(1):1-25. doi: 10.26766/pmgrp.v10i1.598.
7. Kokun OM, Moroz VM, Lozinska NS, Pishko IO. Collection of psychodiagnostic methods for professional and psychological selection of candidates for military service under contract in the Armed Forces of Ukraine: a methodical guide. Kyiv: Os- vita Ukrainy; 2021. 74 p. (in Ukrainian).
8. Ryu MY, Martin MJ, Jin AH, Tabor HK, Wren SM. Characterizing Moral Injury and Distress in US Military Surgeons Deployed to Far-Forward Combat Environments in Afghanistan and Iraq. *JAMA Netw Open*. 2023 Feb 1;6(2):e230484. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.0484.
9. Modlin DM, Aranda MC, Caddell EC, Faler BJ. An Analysis of Burnout among Military General Surgery Residents. *J Surg Educ*. 2020 Sep-Oct;77(5):1046-1055. doi: 10.1016/j.jsurg.2020.03.002.
10. Tam A, Bateman S, Buckingham G, et al. The effects of stress on surgical performance: a systematic review. *Surg Endosc*. 2025 Jan;39(1):77-98. doi: 10.1007/s00464-024-11389-3.
11. Jones M, Fear NT, Greenberg N, et al. Do medical services personnel who deployed to the Iraq war have worse mental health than other deployed personnel? *Eur J Public Health*. 2008 Aug;18(4):422-427. doi: 10.1093/eurpub/ckn031.
12. Cawkill P, Jones M, Fear NT, et al. Mental health of UK Armed Forces medical personnel post-deployment. *Occup Med (Lond)*. 2015 Mar;65(2):157-164. doi: 10.1093/occmed/kqu200.
13. Adler AB, Adrian AL, Hemphill M, Scaro NH, Si-pos ML, Thomas JL. Professional Stress and Burnout in U.S. Military Medical Personnel Deployed to Afghanistan. *Mil Med*. 2017 Mar;182(3):e1669-e1676. doi: 10.7205/MILMED-D-16-00154.
14. Tropf JG, Murphy TP, Colantonio DF, Dingle ME, Tucker CJ. Burnout in Military Orthopedic Surgeons: A Multicenter, Cross-Sectional Study. *Mil Med*. 2025 Jun 30;190(7-8):e1698-e1705. doi: 10.1093/milmed/usaf003.
15. Garbuzova V, Ulunova A, Minenko S. Assessment of the quality of professional life and resilience of medical personnel working in military medical and rehabilitation facilities during the war in Ukraine. *Eastern Ukrainian Medical Journal*. 2024;12(3):492-504. doi: 10.21272/eumj.2024;12(3):492-504.
16. Balazs GC, Blais MB, Bluman EM, Andersen RC, Potter BK. Blurred front lines: triage and initial management of blast

injuries. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2015 Sep;8(3):304-311. doi: 10.1007/s12178-015-9288-5.

17. Gourgiotis S, Schmidt R. The experience of military surgeons from a north Afghanistan deployment and lessons for the future. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2011 Jul;17(4):289-292. doi: 10.5505/tjtes.2011.57355.

18. Baker JB, Blumhorst J, Strating SJ, et al. Proof of concept of an Automated Battlefield Trauma System for large-scale combat operations. *J Trauma Acute Care Surg*. 2025 Aug 1;99(3S Suppl 1):S170-S174. doi: 10.1097/TA.0000000000004675.

19. Kotwal RS, Staudt AM, Mazuchowski EL, et al. A US military Role 2 forward surgical team database study of combat mortality in Afghanistan. *J Trauma Acute Care Surg*. 2018 Sep;85(3):603-612. doi: 10.1097/TA.0000000000001997.

20. Chorna V, Savichan K, Bozhytska O, Nesterova SY, Kolomiets V. Structuring features and consequences of combat trauma, infectious complications of wounds and rehabilitation period of servicemen depending on various factors. In: Tashchuk V, Malinevska-Biliichuk O, Al Salama M, et al.; International Science Group. *Modern ways of developing medicine, biology and psychology as methods of protecting humans: a collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch; 2025. 80-106. doi: 10.46299/ISG.2025.MONO.MED.1.5.1.

21. Khorram-Manesh A. Surgeons' Roles and Responsibilities in Disaster and Public Health Emergency Management — A Transition from Multitasking Surgeons to a Collaborative Surgical Approach. *Ann Ital Chir*. 2024 Aug;95(4):497-509. doi: 10.62713/aic.3468.

22. Chorna VV, Fedotova VV, Kolomiets VV, et al. Comprehensive analysis of scientific research on penetrating neck injuries in the world and Ukraine. *Travma*. 2025;26(1):11-20. doi: 10.22141/1608-1706.1.26.2025.994 (in Ukrainian).

23. Ramasamy A, Hinsley DE, Edwards DS, Stewart MP, Midwinter M, Parker PJ. Skill sets and competencies for the modern military surgeon: lessons from UK military operations in Southern Afghanistan. *Injury*. 2010 May;41(5):453-9. doi: 10.1016/j.injury.2009.11.012.

24. Barbier O, Racle, M. Has Current French Training for Military Orthopedic Surgeons Deployed in External Operations Been Appropriately Adapted? *Mil Med*. 2018 Sep-Oct;183(9-10):e411-e415. doi: 10.1093/milmed/usy013.

25. Gomes KD, Moore BA, Straud CL, Peterson AL. Identifying Predictors of Positive and Negative Affect at Mid-Deployment Among Military Medical Personnel. *Mil Med*. 2024;189(Suppl 3):142-148. doi: 10.1093/milmed/usae062.

26. Peterson AL, Baker MT, Moore CBA, et al. Deployed Military Medical Personnel: Impact of Combat and Healthcare Trauma Exposure. *Mil Med*. 2019 Jan 1;184(1-2):e133-e142. doi: 10.1093/milmed/usy147.

27. Leners C, Sowers R, Quinn Griffin MT, Fitzpatrick JJ. Resilience and professional quality of life among military health-care providers. *Issues Ment Health Nurs*. 2014 Jul;35(7):497-502. doi: 10.3109/01612840.2014.887164.

28. Free G, Swildens W, Knapen S, Beekman A, van Meijel B. Mentalizing capacities of mental health nurses: A systematic PRISMA review. *J Psychiatr Ment Health Nurs*. 2024 Feb;31(1):87-110. doi: 10.1111/jpm.12963.

29. Free G, Swildens W, Hoogendoorn A, Beekman A, van Meijel B. Empathy and Mentalizing of Mental Health Nurses: A Cross-Sectional Correlational Study. *Int J Ment Health Nurs*. 2025 Feb;34(1):e70002. doi: 10.1111/inm.70002.

30. Campbell-Sills L, Kautz JD, Ray C, et al. Associations of active-duty mental health trajectories with post-military adjustment: Results from the STARRS Longitudinal Study. *J Affect Disord*. 2023 Nov;340:535-541. doi: 10.1016/j.jad.2023.08.029.

31. Fernández Castillo G, Khalid M, Salas E. Beyond communication: an update on transforming healthcare teams. *Front Med (Lausanne)*. 2024 Feb 21;11:1282173. doi: 10.3389/fmed.2024.1282173.

32. Carmona L, Camilo C, Carvalho VS, Chambel MJ. Post-traumatic stress disorder in peacekeepers: a systematic literature review and meta-analysis. *Eur J Psychotraumatol*. 2024;15(1):2413735. doi: 10.1080/20008066.2024.2413735.

33. Choufani C, Barbier O, Demoures T, Mathieu L, Rigal S. Evaluation of a fellowship abroad as part of the initial training of the French military surgeon. *BMJ Mil Health*. 2021 Jun;167(3):168-171. doi: 10.1136/jramc-2019-001303.

34. Korol SO, Bilyi VYu, Humenyuk KV, Gibalo RV, Hryshov AA, Zagovenko MA. Current issues and peculiarities of training military surgeons in the context of full-scale Russian aggression against Ukraine. *Ukrainian Journal of Military Medicine*. 2023;4(1):5-12. doi: 10.46847/ujmm.2023.1(4)-005 (in Ukrainian).

35. Shumaker JT, Shen C, Cole R. Ukrainian Healthcare Professionals' Experiences During Operation Gunpowder: Implications for Increasing and Enhancing Training Partnerships. *Mil Med*. 2024 Aug 30;189(9-10):239-243. doi: 10.1093/milmed/usad484.

Received 05.09.2025

Revised 18.09.2025

Accepted 17.10.2025

Information about authors

Valentyna Chorna, MD, DSc, PhD, Captain of the Medical Service of Reserve, Associate Professor, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: valentina.chorna65@gmail.com; phone: +380 (67) 919-40-38; <https://orcid.org/0000-0002-9525-0613>

Viktoriya Petrushenko, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, Rector, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: rector_vnmu@vnmu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-9255-403X>

Maksym Rybinskyi, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: restful88@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-1617-8332>

Anatolii Tomashevskiy, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Surgery of Medicine Faculty 2, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: tolik196901@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-8519-0488>

Viktoriya Kolomiets, Student, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: vika1915qw@gmail.com; phone: +380 (68) 024-97-32; <https://orcid.org/0009-0006-2991-6241>

Vlada Poliarush, Senior Lecturer, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: vlada.poliarush@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2721-3167>

Yevheniia Tymchuk, PhD in Medicine, Lecturer, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: vinjane777@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-0219-3161>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. This study did not receive external funding.

Data availability. The datasets used and/or analyzed in the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' contribution. Chorna V.V., Petrusenko V.V. — research concept and design, data collection, data analysis and interpretation, writing the article, final approval of the article; Rybinskyi M.V. — research concept and design, data analysis and interpretation, final approval of the article; Tomashevskiy A.V., Poliarush V.V., Tymchuk Ye.V. — research concept and design, data analysis and interpretation, writing the article; Kolomiets V.V. — research concept and design, data collection, data analysis and interpretation.

Чорна В.В., Петрушенко В.В., Рибінський М.В., Томашевський А.В., Коломієць В.В., Поляруш В.В., Тимчук Є.В.
Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна

Психологічна стійкість та менталізація військових хірургів в умовах бойового стресу: мультидисциплінарний підхід до подолання емоційного вигорання

Резюме. Актуальність. Військовий хірург працює в екстремальних умовах, де обмежені ресурси, постійний брак часу і загроза для життя є частиною щоденної реальності. Така ситуація вимагає не лише бездоганної професійної підготовки, а й високого рівня психологічної стійкості, здатності швидко адаптуватися й ефективно діяти під тиском. **Мета:** провести ретроспективний аналіз наукових джерел щодо психологічної стійкості та менталізації військових хірургів як чинників, що сприяють зниженню рівня емоційного вигорання в умовах бойового стресу, й обґрунтувати ефективність мультидисциплінарного підходу до збереження психічного здоров'я медичного персоналу. **Матеріали та методи.** Дослідження базувалося на вивченні вітчизняних та зарубіжних наукових праць із баз даних PubMed і Google Scholar за період 2008–2025 рр. з використанням бібліосемантичного, аналітичного, систематичного, статистичного підходів. Пошук літератури здійснювали за наступними ключовими словами: military surgeons, adaptation to combat, extreme conditions, emotional burnout, psychological resilience. Проведено обстеження 18 військових хірургів (Role 1) для встановлення синдрому професійного вигорання за валідизованою діагностичною методикою О. Чабана та опитувальником «Адаптивність-200». Обробку даних виконано в програмах Excel та Statistica, статистичну вірогідність результатів оцінено за допомогою непараметричного рангового критерію Спірмена. **Результати.** Кореляційний аналіз із використан-

ням рангового коефіцієнта Спірмена виявив статистично значущу лінійну залежність між бальною оцінкою за опитувальником і віком респондентів, а також їхнім трудовим стажем, що вказує на вплив цих чинників на формування синдрому емоційного вигорання. Результати дослідження психологічної стійкості та адаптаційного потенціалу засвідчили наявність наступних характеристик: у 20,0 % респондентів виявлено ознаки нервово-психічної нестійкості; у 40,0 % — зниження комунікативного потенціалу; у 20,0 % — зменшення рівня морально-етичної нормативності; у 20,0 % — низький рівень військово-професійної спрямованості; у 20,0 % — виражені девіантні поведінкові риси; у 20,0 % — маркери підвищеного ризику суїцидальної поведінки. Отримані дані говорять про необхідність системної психологічної підтримки персоналу та впровадження цілеспрямованих корекційно-реабілітаційних програм у межах військово-медичного середовища. **Висновки.** Збереження кадрового потенціалу військової медицини, зокрема хірургів, є стратегічним завданням системи оборони України. Ефективність медичного забезпечення в зоні бойових дій значною мірою визначається професійною підготовкою та психологічною стійкістю персоналу, який працює в умовах високого ризику й обмежених ресурсів.

Ключові слова: військові хірурги; емоційне вигорання; психологічна стійкість; адаптація до бойових та екстремальних умов; дефіцит ресурсів; мультидисциплінарний підхід; менталізація

Abdulameer M. Hussein¹, Laith Fathi Sharba²

¹College of Medicine, University of Baghdad, Iraq

²Medical College, Jabir Ibn Hayyan University for Medical & Pharmaceutical Sciences, Iraq

A retrospective analysis of thoracic trauma: outcomes from a tertiary care hospital in war time

Abstract. Background. Thoracic trauma is a significant contributor to morbidity and mortality worldwide, particularly in regions experiencing conflict and civil unrest. In Iraq, penetrating chest injuries due to violence represent a critical healthcare challenge. The purpose was to evaluate the epidemiology, clinical presentation, management strategies, and outcomes in patients with thoracic trauma in Iraq. **Materials and methods.** This retrospective study analyzed data from 1108 chest trauma patients treated between August 2014 and August 2018 at Samarra Temporary Hospitals, Iraq. Patient demographics, injury mechanisms, diagnostic and management strategies (conservative or surgical), indications for thoracotomy, and clinical outcomes were thoroughly documented. Surgical interventions were further categorized into emergency and elective procedures to assess their distinct impact on patient outcomes. **Results.** This study analyzed 1108 chest trauma patients, predominantly young males (male-to-female ratio ~ 7 : 1), with penetrating injuries (96 %) largely from bullets and shells. Hemothorax was the most common radiological finding (62.1 %). Surgical management was required in 86.6 % of cases, mostly tube thoracostomy; urgent thoracotomy was performed in 16.6 %. Complications occurred in 6.86 %, with a mortality rate of 3.6 %, emphasizing the necessity for context-specific and rapid intervention protocols. **Conclusions.** Injuries due to violence during war time in Iraq and Middle East countries unfortunately happened commonly. Using diagnostic imaging, mainly chest X-rays, and timely surgical interventions are critical in improving patient outcomes. Enhanced strategies to address associated injuries are recommended to further reduce morbidity and mortality.

Keywords: chest trauma; thoracotomy; penetrating injury; hemothorax; trauma management; mortality

Introduction

Chest traumas remain highly challenging health issues worldwide, which cause significant morbidity and mortality at war time practically because of presence of vital organs like heart, lungs and mediastinal structures [1].

During war time, the incidence of penetrating trauma is greater than blunt one due to high percentage of explosive and missile injuries. This leads to more severe and unstable patient conditions compared to blunt traumas, which are more common in peacetime and are usually associated with more stable condition. In addition, penetrating injuries correlate strongly with the intensity and nature of violent conflicts, impacting predominantly young adults and economically active populations, thus imposing considerable socioeconomic burdens [2, 3].

Effective management of chest trauma requires rapid and accurate diagnosis, primarily through clinical assessment complemented by radiological investigations such as chest

X-ray and computed tomography, when feasible [4]. Time-ly intervention, particularly surgical management like tube thoracostomy and thoracotomy, is essential to reduce complications and improve survival outcomes in severe cases involving hemothorax and pneumothorax [5]. However, the management of thoracic trauma can be further complicated by associated injuries, necessitating a multidisciplinary approach to treatment [6].

The purpose of the study is to evaluate the epidemiology, clinical presentation, management strategies, and outcomes in patients with thoracic trauma in Iraq.

Materials and methods

This retrospective analysis included 1108 patients treated for chest trauma from August 2014 to August 2018 (ISIS era) at Samarra Temporary Hospitals, Saladin Governorate, Iraq. Patient data were meticulously extracted from hospital records, encompassing demographic cha-

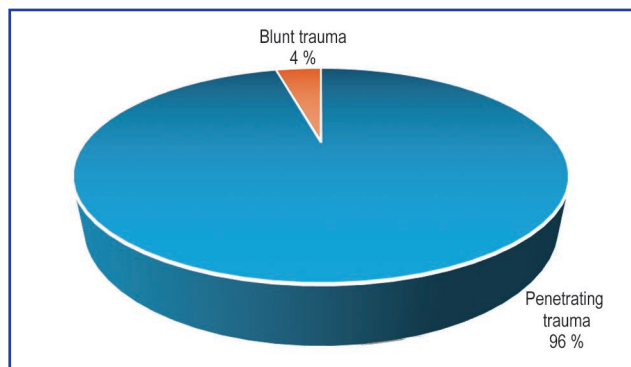


Figure 1. Mechanism of trauma

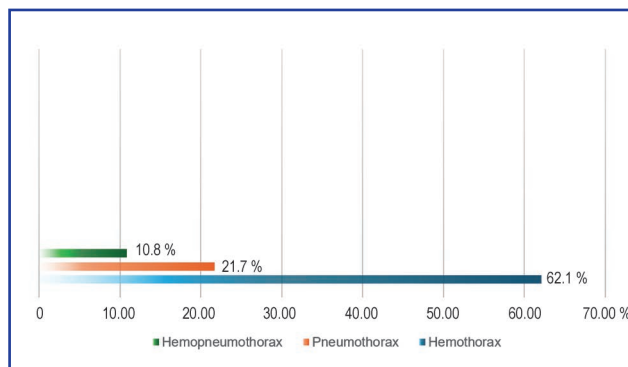


Figure 2. Radiology findings in the study

racteristics, type and mechanism of injury, associated trauma, clinical presentation, diagnostic methods, management approaches (conservative and surgical), indications for thoracotomy, and outcomes including complications and mortality. Patients were categorized into conservative or surgical management groups based on clinical and radiological assessments. The conservative group included patients who received non-operative treatment such as observation and chest tube placement without further surgical intervention. The surgical group comprised patients requiring thoracotomy or additional invasive procedures. Emergency and elective surgical interventions were documented separately to evaluate their impact on outcomes comprehensively.

Results

Among 1108 patients, males predominated significantly, with a male-to-female ratio of approximately 7 : 1. The most affected age group was 21–30 years, highlighting the vulnerability of young adults. Penetrating injuries constituted 96 % of cases, predominantly due to bullets or shells (74 %). Blunt trauma accounted for only 4 % of cases, it was primarily caused by blunt objects and road traffic accidents (Fig. 1). Associated injuries occurred in 40.4 % of cases, most frequently affecting limbs (20.6 %), followed by abdominal (10.1 %), head and neck (6.5 %), and spinal injuries (0.7 %).

Radiological thoracic changes were detected in 1048 patients: hemothorax was the predominant finding in 688 patients (62.1 %), followed by pneumothorax in 240 patients (21.7 %) and hemopneumothorax in 120 patients (10.8 %) (Fig. 2).

Conservative management was applicable in 148 patients (13.4 %), involving close monitoring and minimal intervention. Surgery was required in 960 patients (86.6 %), primarily tube thoracostomy alone in 743 patients (67.1 %). However, combined procedures, including thoracotomy, were necessary in 217 patients (19.5 % of all patients, not just surgical cases). Urgent thoracotomy was performed in 184 patients (16.6 %), primarily indicated by high initial chest tube drainage (> 3 ml/kg), hemodynamic instability, and ongoing bleeding (Fig. 3).

Postoperative complications occurred in 76 patients (6.86 %), with wound infections in 24 (2.17 %) cases and

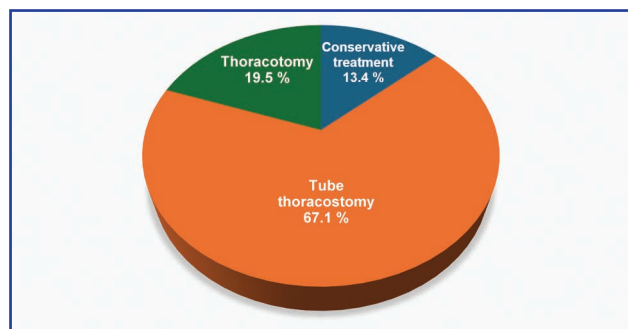


Figure 3. Management in the study

atelectasis in 20 (1.81 %) being the most common. Other less frequent complications included respiratory distress syndrome, postoperative bleeding, stress ulcer, and post-intubation tracheal stenosis (Table 1). Overall mortality was 3.6 % (40 patients, exclusively those with penetrating injuries, predominantly associated with multi-organ involvement and severe initial presentation). Use of statistics to show the correlation between our data considering the p-value and chi-square as we already done in previous research is not applicable here.

Table 1. Postoperative complications

Postoperative complications	No. of patients	%
Wound infections	24	2.17
Atelectasis	20	1.81
Respiratory distress syndrome	12	1.08
Postoperative bleeding	10	0.90
Stress ulcer	8	0.72
Post-intubation tracheal stenosis	2	0.18

Discussion

This study highlights the substantial impact of penetrating chest injuries in conflict-affected regions, particularly during the ISIS era in Iraq. The high prevalence of penetrating injuries, predominantly caused by bullets

and explosive devices, reflects the direct consequences of ongoing violence and instability [7]. The observed demographic pattern, primarily affecting young males, underscores the severe socioeconomic implications, as this group is typically the most economically productive in society [8].

The necessity for surgical intervention in most cases emphasizes both the severity of injuries and the critical role of timely and aggressive surgical management strategies. The predominance of hemothorax aligns with high-energy injury mechanisms associated with penetrating trauma, reinforcing the importance of rapid diagnostic imaging techniques, mostly chest radiography, for initial assessment and decision-making [9]. Although computed tomography could provide additional diagnostic precision, its utility in emergent situations is often limited due to hemodynamic instability and availability constraints in resource-limited settings [10].

The relatively low morbidity and mortality rates observed in this study can be attributed to effective protocol-driven interventions and rapid surgical management. Nonetheless, the presence of associated injuries considerably complicates clinical management, increasing morbidity and prolonging length of stay [11]. These findings align with international data, which emphasize that polytrauma significantly influences clinical outcomes and resource utilization.

Despite the positive outcomes, variability in complication rates and mortality when compared to international benchmarks highlights the urgent need for context-specific trauma management guidelines tailored to regions experiencing ongoing conflict. Enhanced multidisciplinary collaboration and continued education for healthcare providers in trauma care protocols are essential strategies to further improve patient outcomes [12].

Conclusions

Injuries due to violence during war time in Iraq and Middle East countries unfortunately happened commonly. Using diagnostic imaging, mainly chest X-rays, and timely surgical interventions are critical in improving patient outcomes. Enhanced strategies to address associated injuries are recommended to further reduce morbidity and mortality.

References

1. Sharba LF, Abood LS, Fahad AM. Comparative efficacy of surgical interventions for cardiac trauma: with and without cardiopulmonary bypass. *Cardiol Belarus*. 2025;17(1):94-99. doi: 10.34883/PI.2025.17.1.007.
2. Abdulrahman Y, Al-Ani M, Farhat M, et al. Implementing a chest tube removal protocol in patients with thoracic trauma: a prospective clinical study. *J Thorac Dis*. 2025 Mar 31;17(3):1301-1311. doi: 10.21037/jtd-24-1229.
3. Gupta S, Kumar A, Kaur T, et al. Current updates in acute traumatic aortic injury: radiologic diagnosis and management. *Clin Exp Emerg Med*. 2022 Jun;9(2):73-83. doi: 10.15441/ceem.22.233.
4. Van Aswegen H, Roos R, Svensson-Raskh A, et al. Clinical presentation, acute care management and discharge information of patients with thoracic trauma in South Africa and Sweden: a prospective multicenter observational study. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025 Jan 16;51(1):21. doi: 10.1007/s00068-024-02753-y.
5. Hardcastle T, Oosthuizen G, Clarke D, Lutge E. Trauma, a preventable burden of disease in South Africa: Review of the evidence, with a focus on KwaZulu-Natal. *South African Health Review*. 2016;1:179-189.
6. Kondo M, Ijuin S, Haraguchi T, et al. The role and timing of cardiopulmonary bypass in the surgical repair of traumatic cardiac injury. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*. 2023 Oct;71(10):561-569. doi: 10.1007/s11748-023-01931-w.
7. Singh AK, Mishra P. Clinical Epidemiology of Trauma Patients: A Retrospective Analysis of 3705 Consecutive Patients Treated at a Level I Trauma Center. *Cureus*. 2025 Mar 16;17(3):e80657. doi: 10.7759/cureus.80657.
8. Lurin I, Vorovskiy O, Makarov V, et al. Management of thoracoabdominal gunshot injuries by using minimally invasive surgery at role 2 deployed field hospitals in Ukraine. *BMC Surg*. 2024 Jun 14;24(1):183. doi: 10.1186/s12893-024-02475-3.
9. Mekkodathil A, El-Menyar A, Kanbar A, et al. Epidemiological and clinical characteristics of fall-related injuries: a retrospective study. *BMC Public Health*. 2020 Jul 29;20(1):1186. doi: 10.1186/s12889-020-09268-2.
10. Jain A, Waseem M. Chest Trauma. In: *StatPearls. Treasure Island, FL: StatPearls Publishing*; 2025 Jan.
11. Lee C, Revell M, Porter K, Steyn R. The prehospital management of chest injuries: a consensus statement. *Faculty of Pre-hospital Care, Royal College of Surgeons of Edinburgh. Emerg Med J*. 2007 Mar;24(3):220-224. doi: 10.1136/emj.2006.043687.
12. Karajizadeh M, Adollahi M, Yousefi MR, Bordbar N. Mortality risk factors in chest trauma patients in a level one trauma center in southern Iran. *Sci Rep*. 2025 Sep 2;15(1):32310. doi: 10.1038/s41598-025-13830-6.

Received 21.07.2025

Revised 02.09.2025

Accepted 09.09.2025

Information about authors

Abdulameer M. Hussein, Assisted Professor, Consultant Cardiothoracic and Vascular Surgeon, Surgical Department, Medical College, University of Baghdad, Baghdad, Iraq; e-mail: abdulameer.m@comed.uobaghdad.edu.iq; <http://orcid.org/0000-0002-4316-3366>

Laith Fathi Sharba, Assisted Professor, Consultant Cardiothoracic & Vascular Surgeon, Surgical Department, Medical College, Jabir Ibn Hayyan University for Medical & Pharmaceutical Sciences, Najaf, Iraq; e-mail: ahmeds201258@yahoo.com; laith.fathi@jmu.edu.iq; <https://orcid.org/0000-0002-2206-705X>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Abdulameer M. Hussein¹, Laith Fathi Sharba²

¹College of Medicine, University of Baghdad, Iraq

²Medical College, Jabir Ibn Hayyan University for Medical & Pharmaceutical Sciences, Iraq

Ретроспективний аналіз травм грудної клітки: результати лікування в закладі третинного рівня у воєнний час

Резюме. Актуальність. Травма грудної клітки є значним фактором захворюваності та смертності в усьому світі, особливо в регіонах, де відбуваються конфлікти й масові заворушення. В Іраку проникні поранення грудної клітки внаслідок насильства становлять критичну проблему охорони здоров'я.

Мета: оцінити епідеміологію, клінічну картину, стратегії та результати лікування в осіб із травмою грудної клітки в Іраку.

Матеріали та методи. У цьому ретроспективному дослідженні проаналізовано дані 1108 пацієнтів із травмами грудної клітки, які отримували лікування з серпня 2014 року до серпня 2018 року в тимчасових лікарнях Самарри (Ірак). Демографічні дані учасників, механізми травмування, діагностичні й лікувальні стратегії (консервативні або хірургічні), показання до торакотомії та клінічні результати були ретельно задокументовані. Хірургічні втручання додатково класифіковані як екстрені та планові, щоб оцінити особливий вплив на результати лікування. **Результати.** У цьому дослідженні проаналізовано дані 1108 пацієнтів із травмами грудної клітки, переважно молодих

чоловіків (співвідношення чоловіків та жінок ~ 7 : 1) із проникними пораненнями (96 %), здебільшого від куль та снарядів. Гемоторакс був найпоширенішою радіологічною знахідкою (62,1 %). Хірургічне лікування знадобилося у 86,6 % випадків, переважно зондова торакотомія (із використанням трубки); термінова торакотомія була виконана у 16,6 %. Ускладнення виникли у 6,86 % хворих, а рівень смертності становив 3,6 %, що підкреслює необхідність контекстно-специфічних і швидких протоколів втручання. **Висновки.** На жаль, травми, спричинені насильством, під час війни в Іраку та країнах Близького Сходу траплялися часто. Використання діагностичної візуалізації, головним чином рентгенографії грудної клітки, та своєчасне хірургічне втручання мають вирішальне значення щодо поліпшення результатів лікування. Для подальшого зниження захворюваності й смертності рекомендуються вдосконалені стратегії лікування супутніх травм.

Ключові слова: травма грудної клітки; торакотомія; проникне поранення; гемоторакс; лікування травм; смертність

Бур'янов О.А.¹, Кваша В.П.¹, Ярмолюк Ю.О.^{1,2}, Пасенко М.С.¹¹Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна²Національний військово-медичний клінічний центр «Головний військовий клінічний госпіталь», м. Київ, Україна

Сучасні технології заміщення дефектів кісткової тканини (bone transport, Masquelet) (огляд літератури та метааналіз)

Резюме. Актуальність. Дефекти кісток (ДК) — патологічний стан, що характеризується втратою об'єму кісткової тканини, який не може самостійно відновитись навіть за умови адекватних заходів та хірургічної стабілізації. У літературі такий стан характеризується як критичний дефект: довжина понад 2 см та втрата кісткової маси понад 50 %. ДК розподіляються на первинні або вторинні та є наслідком доволі широкого за своєю природою кола чинників: пухлини опорно-рухового апарату, інфекції, високоенергетичні пошкодження, остеофіброзні дисплазії або вроджені вади (Adams-Oliver syndrome). З початком повномасштабної агресії головним чинником як первинних, так і вторинних ДК стали бойові ураження (вогнепальні та мінно-вибухові), які виникають у результаті високоенергетичного комбінованого впливу та призводять до поліструктурних пошкоджень. **Мета:** порівняти клінічні результати методики Masquelet та методу транспортування кісток при лікуванні пацієнтів з сегментарними дефектами довгих кісток кінцівок. **Матеріали та методи.** У двох базах даних (PubMed, Embase) було проаналізовано сучасну літературу щодо лікування дефектів довгих трубчастих кісток за період з 2016 по 2025 р. з використанням методу Ілізарова — кістковий транспорт та Masquelet — індукована мембрана, за ключовими словами: bone defect, nonunion, bone transport, Masquelet method, complications. **Результати.** Найпоширенішими недоліками та ускладненнями при кістковому транспорті є довготривале використання зовнішньої конструкції, інфекція місця закріплення штифта (65,96 %), аксіальне відхилення (40,78 %), скутість суглоба (23,76 %), стискання м'яких тканин (22,34 %) та затримка зрощення місця стикування (13,48 %). Для зменшення їх кількості запропоновано цілу низку різнопланових удосконалень. Зокрема, набирає популярності трифокальний спосіб, застосування односторонніх зовнішніх фіксаторів з інтрамедулярними фіксаторами, інтрамедулярний кабельний транспорт, транспортування кістки за допомогою магнітних інтрамедулярних стрижнів. Позитивні результати при застосуванні методу Masquelet становлять близько 86 % проти 95 % при кістковому транспорті, однак перший демонструє переваги у нижчій вартості госпіталізації, коротшому часі остаточного зрощення до повного навантаження, нижчій частоті ускладнень та кращій післяопераційній якості життя. **Висновки.** Метод кісткового транспорту та Masquelet є сучасними найбільш вживаними технологіями при лікуванні пацієнтів з дефектами кісткової тканини. Позитивні результати при застосуванні цих методик становлять близько 86–95 %, що з урахуванням поліструктурних уражень є доволі значущим показником. Кожен метод характеризується своїми позитивними сторонами та недоліками, які зумовлені особливостями його реалізації та тяжкістю пошкодження, що потребує їх застосування за чітко визначеними показаннями.

Ключові слова: кістковий дефект; незрощення; кістковий транспорт; метод Masquelet; ускладнення

Вступ

Дефекти кісток (ДК) — патологічний стан, що характеризується втратою об'єму кісткової тканини, який не може самостійно відновитись навіть за умови адекватних заходів та хірургічної стабілізації [1]. У

літературі такий стан характеризується як критичний дефект: довжина понад 2 см та втрата кісткової маси понад 50 % [2].

ДК розподіляються на первинні або вторинні та є наслідком доволі широкого за своєю природою кола

чинників: пухлини опорно-рухового апарату, інфекції, високоенергетичні пошкодження, остеοфіброзні дисплазії або вроджені вади (Adams-Oliver syndrome) [3, 4].

ДК зустрічаються у 0,4 % від усієї кількості потерпілих з переломами кісток, а у пацієнтів при відкритих високоенергетичних травмах становлять до 11,4 % [5, 6].

З початком повномасштабної агресії головним чинником як первинних, так і вторинних ДК стали бойові ураження (вогнепальні та мінно-вибухові), які виникають у результаті високоенергетичного комбінованого впливу та призводять до поліструктурних пошкоджень [7, 8]. Сучасні війни характеризуються використанням різноманітних видів зброї та вогневих засобів ураження з великою кінетичною енергією, різноманітними формами та композитним складом снаряду, що ранили [9].

Балістичні параметри сучасної зброї суттєво змінили характер та структуру бойових уражень, які супроводжуються мікробною контамінацією [10].

Стосовно пошкоджень анатомічних ділянок, незважаючи на відсутність вірогідних статистичних даних за об'єктивних обставин, превалюють пошкодження

нижніх кінцівок (близько 80 %), і ця тенденція продовжує збільшуватись. Окрім цього, зростає кількість бойових уражень сегментів кінцівок з кістковими дефектами (за попередніми даними, близько 11–17 %) [11].

Найбільш вживаними технологіями заміщення КД є методика дистракційного остеогенезу, або кісткового транспорту, та методика Masquelet, кожна з яких має свої недоліки та переваги [12, 13]. Поряд з тим, що накопичено достатньо знань та практичного досвіду їх застосування, актуальним питанням є порівняльний аналіз цих методик та визначення результативності при лікуванні пацієнтів з КД.

Мета: порівняти клінічні результати методики Masquelet та методу кісткового транспорту при лікуванні пацієнтів із сегментарними дефектами довгих кісток кінцівок.

Матеріал та методи

У двох базах даних (PubMed, Embase) було проаналізовано сучасну літературу щодо лікування дефектів довгих трубчастих кісток за період з 2016 по 2025 р. з використанням методу Ілізарова — кістковий транспорт

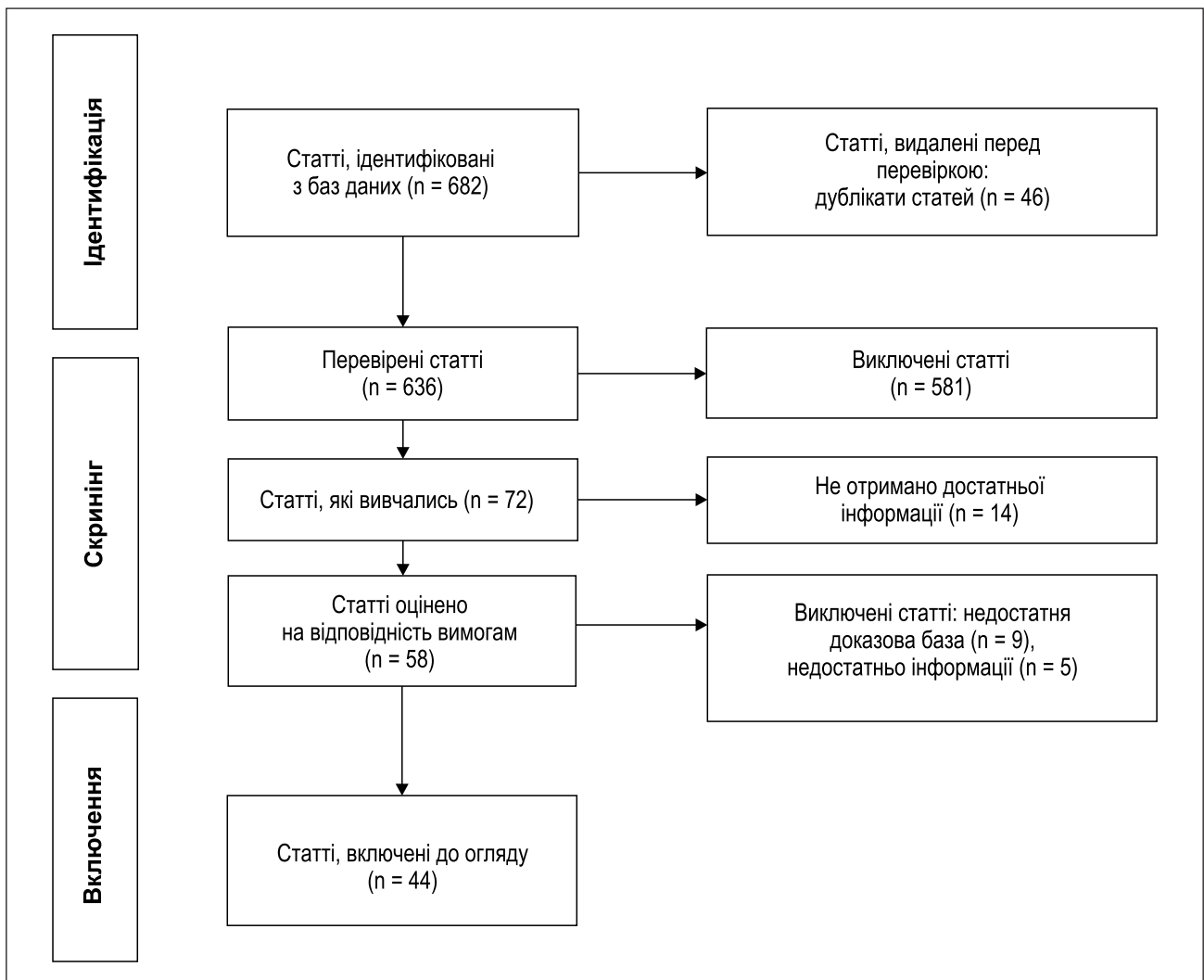


Рисунок 1. Схема відбору літературних джерел

(КТ) та Masquelet — індукована мембрана (ІМ), за ключовими словами: bone defect, nonunion, bone transport, Masquelet method, complications. Назви та анотації були переглянуті під час відбору, потенційно релевантні статті були вивчені та оцінені для включення.

Критерії включення: повні тексти статей, які містять достатню кількість клінічних досліджень, а пацієнтам із сегментарними дефектами кістки проводилось лікування шляхом КТ або ІМ.

Критерії виключення: звіти про окремі випадки, пілотні та попередні дослідження.

Статті обирали, якщо вони містили результати лікування, ускладнення після лікування, які базуються на достатній кількості пацієнтів, а також порівняльні роботи стосовно вищезазначених способів. При дослідженні використовували концепцію Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines [14]. Аналіз відібраної літератури проводився з використанням RStudio (<https://www.rstudio.com/>) (рис. 1).

Характеристика статей, відібраних для подальшого аналізу, наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Статті, відібрані для подальшого аналізу

Автор, рік, країна	Характер пошкодження	Метод відновлення		Дизайн дослідження
		Кістковий транспорт	Masquelet	
1	2	3	4	5
Zhang Q. і співавт., 2024, China [15]	Відкритий перелом, Gustilo IIIB/CI	35	30	Ретроспективне
Grün W. і співавт., 2023, Norway [16]	Медіана довжини дефекту кістки становила 9 (3–15) см		17	Ретроспективне
Mathieu L. і співавт., 2020, France [17]	Відкритий перелом, Gustilo II та Gustilo IIIB		15	Ретроспективне
Fung B. і співавт., 2019, Canada [18]	Середній розмір дефекту становив 5,9 см (від 0,5 до 26 см)		48	Ретроспективне
Hsu C.A. і співавт., 2020, Taiwan [19]	Середній розмір дефекту великого-мілкової кістки — 5,5 см (діапазон: 0–20 см)		115	Ретроспективне
Yoon Y.C. і співавт., 2022, Korea [20]	Середня довжина дефекту кістки становила 43,9 мм, а розмір дефекту м'яких тканин — 79,3 см ²		32	Проспективне
Chloros G.D. і співавт., 2022, United Kingdom [21]	Середній розмір кісткового дефекту 6 см (діапазон 4–8 см)		17	Ретроспективне
Kołodziejczyk K. і співавт., 2024, Poland [22]	Середня довжина дефекту становила 7,9 см для верхньої кінцівки (3,5–18) та 5,3 см для нижньої кінцівки (3–11)		45	Проспективне
Tsang S.J. і співавт., 2020, India [23]	Відкритий перелом, Gustilo IIIB		96	Ретроспективне
Shen J. і співавт., 2023, Iraq [24]	Середній розмір дефекту становив 6,8 см (від 0,5 до 30 см)		44	Проспективне
Wang P. і співавт., 2020, China [25]	Середня довжина дефекту кістки становила 6,3 см		45	Ретроспективне
Özpolat N. і співавт., 2022, Türkiye [26]	Середня довжина кісткових дефектів після радикальної санації становила 51 мм (25–98)		12	Проспективне
Lu Y. і співавт., 2023, China [27]	Середня довжина кісткових дефектів від 7,8 ± 2,4 до 8,1 ± 2,6 см	50		Ретроспективне
Qian Wang і співавт., 2024, China [28]	Середні залишкові дефекти кістки становили 2,9 ± 1,9 см	23		Ретроспективне
Liu Y. і співавт., 2020, China [29]	Середній дефект становив 6,56 ± 2,15 см	282		Ретроспективне
Kinik H. і співавт., 2021, Turkey [30]	Довжина дефекту становила 8–9,5 см	30		Ретроспективне

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
Liu K. і співавт., 2023, China [31]	Середня довжина кісткового дефекту становила 4,60 ± 1,83 см	62		Ретроспективне
Xie J. і співавт., 2021, China [32]	Середня довжина кісткового дефекту становила 6,1 ± 1,5 см	189		Ретроспективне
Shi B. і співавт., 2024, China [33]	Дефект кістки більше ніж 3 см	62		Ретроспективне
Huang Q. і співавт., 2021, China [34]	Діапазон дефектів великогомілкової кістки становив 6–22 см	85		Ретроспективне
Feng D. і співавт., 2023, China [35]	Довжина дефекту великогомілкової кістки ≥ 3 см	199		Ретроспективне

Таблиця 2. Результати дослідження та висновки авторів

Автор, рік, країна	Метод відновлення		Результати, висновки
	Кістковий транспорт	Masquelet	
1	2	3	4
Zhang Q. і співавт., 2024, China [15]	35	30	Група А — Masquelet та внутрішня фіксація (n = 35), група В — КТ (n = 30). Середній період спостереження становив 28 місяців (діапазон 13–133 місяці). Повне відновлення дефектів м'яких тканин і кістки було досягнуто у всіх випадках. Середній час консолідації (А) становив 6 місяців (діапазон 3–12 місяців) та 11 місяців (діапазон 6–23 місяці) у групі В, зі значною різницею між двома групами (Z = -4,11, P = 0,001). Середній час перебування в лікарні становив 28 днів (діапазон 14–67 днів) у групі А, що було значно довше, ніж середній час перебування 18 днів (діапазон 10–43 дні) у групі В (Z = -2,608, P = 0,009). Не було виявлено суттєвих відмінностей у рівні інфекції між групою А (17,1 %) та групою В (26,7 %) ($\chi^2 = 0,867$, P = 0,352). Загальні показники фізичного здоров'я становили 81,51 ± 6,86 (діапазон 67–90) у групі А та 75,83 ± 16,14 (діапазон 44–98) у групі В, без суттєвої різниці між двома групами (t = 1,894, P = 0,063). Загальні показники психічного здоров'я були значно вищими в групі А (90,49 ± 6,37; діапазон 78–98), ніж у групі В (84,70 ± 13,72; діапазон 60–98) (t = 2,232, P = 0,029). Порівняно з КТ ІМ є кращим методом лікування відкритих дефектів великогомілкової кістки та м'яких тканин з переломами за класифікацією Gustilo IIIB/C. КТ є кращим варіантом, коли дефект великогомілкової кістки більше за 7 см
Grün W. і співавт., 2023, Norway [16]		17	Медіана довжини дефекту стегнової та великогомілкової кістки становила 9 (3–15) см. У 58,8 % пацієнтів проводились додаткові оперативні втручання після другого етапу ІМ. Медіана LEFS становила 59 (15–80), а сумарний показник фізичного компонента (PCS) та сумарний показник психічного компонента (MCS) за шкалою SF-36 становили 41,3 (24,0–56,1) та 56,3 (13,5–66,2) відповідно. У 64,7 % пацієнтів зрощення було досягнуто безпосередньо після другого етапу. В 11,7 % спостерігалась резорбція кістки. Такі результати вказують на високу частоту ускладнень після 2-ї стадії ІМ при сегментарних дефектах стегнової та великогомілкової кісток, що потребують додаткових оперативних втручань. Однак під час подальшого спостереження відзначалися задовільні функціональні результати, а також хороший рівень зрощення
Mathieu L. і співавт., 2020, France [17]		15	Середній вік пацієнтів 39 років, травми за класифікацією Gustilo II (2 випадки) або Gustilo IIIB (13 випадків). Середня кількість обробок ран перед першим етапом становила 2,9. Середній період спостереження становив 33 місяці. Зрощення кісток було досягнуто у 87 % в середньому за 10,1 місяця. Однак знадобилося 7 додаткових процедур загоєння кісток, включно з 6 повторними трансплантатами. Первинне інфікування є серйозною проблемою при дефектах великогомілкової кістки, особливо при високоенергетичних травмах багатьох тканин

Продовження табл. 2

1	2	3	4
Fung B. і співавт., 2019, Canada [18]		48	Середній вік пацієнтів становив 40,7 року (від 4 до 88), а середній розмір дефекту становив 5,9 см (від 0,5 до 26). Загалом у 82,3 % випадків досягнуто зрощення після другого етапу за методом IM. Середній час до зрощення становив 6,6 місяця (від 1,4 до 58,7) після другого етапу. Пацієнти з дефектами великогомілкової кістки та ті, хто мав більші дефекти, мали значно вищу ймовірність розвитку післяопераційної інфекції. Аналіз також продемонстрував тенденцію до включення антибіотиків до цементного спейсера, що має захисний ефект від необхідності додаткових процедур
Hsu C.A. і співавт., 2020, Taiwan [19]		115	Середній вік пацієнтів становив 43,6 року (діапазон: 18–84 роки), а середня довжина дефекту великогомілкової кістки — 5,5 см (діапазон: 0–20 см). Багатовимірний логістичний регресійний аналіз показав, що чинниками ризику післяопераційної інфекції після IM були інфіковане незрощення ($p = 0,0160$) та довжина дефекту ≥ 7 см ($p = 0,0291$). У пацієнтів з інфекцією після IM спостерігався нижчий рівень зрощення ($p = 0,0003$). Крім того, використання антибіотичного поліметилметакрилатного цементного спейсера зменшило потребу в хірургічній ревізії ($p = 0,0127$). Множинна логістична регресія не вказала на прямий зв'язок між рівнем зрощення та довжиною дефекту кістки. IM є надійним та відтворюваним методом лікування сегментарних дефектів великогомілкової кістки. Однак початкове інфіковане незагоєння дефекту та довжина дефекту понад 7 см є чинниками ризику
Yoon Y.C. і співавт., 2022, Korea [20]		32	У 32 пацієнтів середня довжина дефекту кістки становила 43,9 мм, м'яких тканин — 79,3 см ² . На першому етапі було встановлено спейсер та проведена обробка рани з іригацією, яку тимчасово зафіксували зовнішнім фіксатором. Під час наступної операції було встановлено внутрішній фіксатор і проведено клаптеве заміщення м'яких тканин та заміну цементного спейсера. Під час третьої операції було встановлено автогенний кістковий трансплантат. Зрощення кістки було досягнуто у всіх випадках, окрім одного, і в середньому знадобилося 9,4 місяця. Ускладнення виникли у 31,2 %. Хороші або найкращі клінічні ефекти, з точки зору радіологічних та функціональних балів за ASAMI, спостерігалися у 29 та 24 випадках відповідно. Ускладнення й додаткові хірургічні втручання були поширеними чинниками, що впливали на обидва показники за ASAMI
Chloros G.D. і співавт., 2022, United Kingdom [21]		17	Середній розмір кісткового дефекту 6 см (діапазон 4–8 см), зрощення досягнуто у 88,2 % пацієнтів, середній термін 8 місяців (діапазон 5–18 місяців). Методика Masquelet є простою, ефективною та має високий рівень успіху в лікуванні різних випадків, включно з гострою втратою кісткової тканини або інфікованими незрощеннями, і пов'язана з низькою частотою ускладнень
Kołodziejczyk K. і співавт., 2024, Poland [22]		45	Середня довжина дефекту становила 7,9 см для верхньої кінцівки (3,5–18) та 5,3 см для нижньої кінцівки (3–11). Середній час досягнення кісткового зрощення та ремоделювання становив 6,0 місяця (3–12) та 9 місяців (3–13) для верхніх і нижніх кінцівок відповідно. Клінічна оцінка наприкінці лікування (досягнення кісткового зрощення) показала статистично значуще поліпшення за шкалами DASH, SF-36 та LLFI щодо до- та післяопераційних результатів. Представлений реконструктивний підхід до лікування дефектів кісток і порушень загоєння демонструє ефективність техніки індукованих мембран за короткий період спостереження, з відносно високим рівнем комфорту пацієнтів та добрими клінічними результатами в лікуванні тяжких дефектів кісток, особливо інфекційної етіології
Tsang S.J. і співавт., 2020, India [23]		96	Більшість дефектів кісток були результатом відкритих переломів (75/96), причому 67 % були пов'язані з травмами за класифікацією Gustilo-Anderson IIIB. Спостерігалася статистична різниця в ймовірності зрощення між стратегіями лікування: у понад 90 % випадків гострого вкорочення та транспортування кістки

Продовження табл. 2

1	2	3	4
			відзначене зрощення, і лише у 72 % випадків, у яких застосовувалася техніка індукованої мембрани, відбулася консолідація ($p = 0,049$). Серед дефектів, що консолідувалися, не було різниці в часі до зрощення кісток між стратегіями ($p = 0,308$) із загальною медіаною часу до зрощення 8,33 місяця (95% ДІ 7,4–9,2 місяця). Техніка індукованої мембрани була пов'язана з 40% ризиком повторного нагноєння
Shen J. і співавт., 2023, Iraq [24]		44	Середній розмір дефекту становив 6,8 см (від 0,5 до 30). Після індексної процедури другого етапу 85 % (797/942) сегментів досягли зрощення, а 92 % (999/1083) сегментів досягли остаточного загоєння. Багатовимірний аналіз даних 296 пацієнтів показав, що старший вік пов'язаний з вищим ризиком незрощення. Пацієнти із зовнішньою фіксацією на другому етапі мали значно вищий ризик розвитку незагоєння, що збільшувало потребу в додаткових процедурах. Автотрансплантати, отримані з розширювача іригатора-аспіратора стегнової кістки, збільшували частоту незагоєння, рецидивів інфекції та додаткових процедур
Wang P. і співавт., 2020, China [25]		45	Середній вік пацієнтів становив 38,5 року (22–55 років). Середня довжина дефекту кістки становила 6,3 см. У 6 пацієнтів виникли ускладнення, що призвело до частоти ускладнень 14,3 %. Зв'язок між довжиною дефекту кістки та об'ємом кісткових трансплантатів становив $Y = 7,210 + 6,954 \times X$ у пацієнтів, які отримували сталеві пластини; $Y = 10,962 + 5,029 \times X$ у пацієнтів, які отримували інтрамедулярні штифти, та $Y = 11,498 + 5,474 \times X$ незалежно від методів внутрішньої фіксації
Özpolat N. і співавт., 2022, Türkiye [26]		12	Середня довжина кісткових дефектів після радикальної санації становила 51 мм (25–98). Загоєння перелому спостерігалось у 81 % пацієнтів. Середній час, необхідний для досягнення кісткового зрощення, становив 8,1 (8–12) тижня після другого етапу операції. Методика індукованого мембранного зрощення є надійним методом лікування незрощених переломів великогомілкової кістки. Однак досягнення кісткового зрощення та контроль інфекції при первинно інфікованих незрощених переломах з великим дефектом кістки є непередбачуваними
Lu Y. і співавт., 2023, China [27]	50		Пацієнти спостерігалися протягом 24–52 місяців. Не було суттєвої різниці в часі операції, крововтраті, часі в рамці, EFI та балах за шкалою HSS між двома групами ($p > 0,05$). Однак група PBT продемонструвала кращі клінічні ефекти, ніж група DBT, включаючи вищі бали за шкалою AOFAS, нижчі бали за шкалою VAS та частоту ускладнень ($p < 0,05$). Зокрема, частота інфекції штифтового тракту II ступеня, тимчасової втрати рухливості гомілковостопного суглоба та опущення стопи була значно нижчою в групі PBT, ніж у групі DBT ($p < 0,05$). Хоча обидва методи можна безпечно використовувати для лікування великих сегментарних дефектів великогомілкової кістки, проксимальний кістковий транспорт може забезпечити більшу задоволеність пацієнтів завдяки кращому функціонуванню гомілковостопного суглоба та меншій кількості ускладнень
Qian Wang і співавт., 2024, China [28]	23		Середні залишкові дефекти кістки становили $2,9 \pm 1,9$ см. Середній час фіксації становив $9,5 \pm 3,4$ місяця. У 8,7 % відмічалось незрощення. Відмінний та хороший рівень загоєння дефектів кістки становив 91,3 %. Транспортування кістки в поєднанні з технікою послідовного фіксування цвяхами може скоротити час зовнішньої фіксації, подолати незручності зовнішнього каркаса для пацієнтів, усунути хронічний біль та зробити процедуру легшою для пацієнтів. Пацієнти, у яких використовувалася ця модифікована техніка, досягли високого рівня задоволення
Liu Y. і співавт., 2020, China [29]	282		Середній дефект становив $6,56 \pm 2,15$ см, тоді як однорівневе транспортування було виконано у 221 випадку, а дворівневе транспортування — у 61 випадку. Було 189 проблем, 166 перешкод та 406 ускладнень (257 незначних та 149 серйозних ускладнень), а середня частота ускладнень на одного пацієнта становила 0,91 незначного та 0,53 серйозного ускладнення.

Продовження табл. 2

1	2	3	4
			П'ятьма найпоширенішими ускладненнями були інфекція місця закріплення штифта (65,96 %), аксіальне відхилення (40,78 %), скутість суглоба (23,76 %), стискання м'яких тканин (22,34 %) та затримка зрощення місця стикування (13,48 %). Кістковий результат за ASAMI був відмінним у 82,6 % пацієнтів, добрим у 11,3 %, задовільним у 1,8 % та поганим у 4,3 %. Функціональний результат за ASAMI був відмінним у 48,2 % пацієнтів, добрим у 31,2 %, задовільним у 16,7 % та незадовільним у 3,9 %
Kinik H. і співавт., 2021, Turkey [30]	30		Зрощення та ліквідація інфекції були досягнуті у всіх пацієнтів. Середній дефект кістки 8,1 см. Загальна довжина дистракції для відновлення дефекту становила 9,5 см. Середній термін зовнішньої фіксації становив 13,7 місяця; середній індекс зовнішньої фіксації становив 1,49 міс/см. Згідно з критеріями Paley & Maar та Katsenis, результати лікування кісток були відмінними та добрими у 80 %, функціональні показники були відмінними та добрими у 93,3 %. Незначні ускладнення становили 1,36 на пацієнта, серйозні ускладнення — 0,4 на пацієнта, а постійні ускладнення — 0,2 на пацієнта в досліджуваній групі
Liu K. і співавт., 2023, China [31]	62		КТ забезпечувався одностороннім зовнішнім апаратом, середній час кісткового зрощення $7,30 \pm 1,71$ місяця. Оцінка результатів проводилась за критеріями ASAMI. Відмінний та хороший рівень кісткового результату в проміжній групі був вищим, ніж в інших (Р проти І проти D: 73,6 проти 84 проти 66,7 %), а відмінний та хороший рівень функціонального результату в проксимальній групі був найвищим (Р проти І проти D: 84,2 проти 80 проти 73,3 %). Ускладнення спостерігалися у 46,7 % пацієнтів, серед яких: інфекція штифтового тракту — 14,8 %, аксіальне відхилення — 14,8 %, контрактури — 12,7 %. Інші ускладнення: затримка зрощення — 6,3 %, відсутність зрощення — 4,2 %, неврологічне ураження — 8,5 %
Xie J. і співавт., 2021, China [32]	189		Згідно з критеріями Пейлі для загоєння кісток та функціональної оцінки, результати загоєння кісток були відмінні у 61 % пацієнтів, добрі у 16 %, задовільні в 11 % та незадовільні у 12 %. Функціональні результати відповідно: відмінні у 40 % пацієнтів, добрі у 34 %, задовільні в 11 %, незадовільні у 14 %. Інфіковане незрощення довгих кісток можна ефективно та безпечно лікувати за допомогою кісткового транспорту (за методом Ілізарова)
Shi B. і співавт., 2024, China [33]	62		Проведено порівняльний аналіз КТ з використанням просторової рами Тейлора та кругового фіксатора Ілізарова. Середня тривалість хірургічного втручання в групі TSF становила $93,8 \pm 7,3$ хв, що було коротше, ніж у групі ICF ($109,8 \pm 1,4$ хв) ($p < 0,05$). Порівняно з групою ICF ($10,2 \pm 2,0$ місяця) група TSF ($9,7 \pm 1,8$ місяця) мала коротший середній час зовнішньої фіксації ($p > 0,05$). Індекс зовнішньої фіксації становив $1,4 \pm 0,2$ міс/см та $1,5 \pm 0,1$ міс/см у двох групах. Медіальний та задній проксимальний кут великогомілкової кістки у групі TSF становили $88,1 \pm 12,1^\circ$ та $80,9 \pm 1,3^\circ$ відповідно. Частота ускладнень у групі TSF становила 50 % і 75 % — у групі ICF. TSF є коротшою та простішою процедурою, яка викликає менше ускладнень та поліпшує вирівнювання кінцівок
Huang Q. і співавт., 2021, China [34]	85		Метою цього дослідження було порівняння клінічних ефектів гібридного транспорту, завантаженого антибіотиком сульфату кальцію (ACSLHT), та традиційного кісткового транспорту за апаратом Ілізарова (TIBT) при лікуванні великих дефектів великогомілкової кістки після травми. Діапазон дефектів великогомілкової кістки становив 6–22 см. Не було виявлено суттєвої різниці в загальних доопераційних даних між групами ACSLHT та TIBT. Бал EFI у групах ACSLHT та TIBT становив $0,6 \pm 0,1$ см/місяць та $1,7 \pm 0,3$ см/місяць відповідно ($P < 0,05$). Показник за шкалою Еннекінга у групах ACSLHT та TIBT становив 86,5 та 75,1 % ($P < 0,05$). Бал SAS у групі ACSLHT був значно нижчим, ніж у групі TIBT ($P < 0,05$). Частота ускладнень у групі ACSLHT була значно нижчою, ніж у групі TIBT ($P < 0,05$)

Закінчення табл. 2

1	2	3	4
Feng D. і співавт., 2023, China [35]	199		Загалом сталося 310 ускладнень, у середньому 1,04 незначного ускладнення та 0,48 серйозного ускладнення на одного пацієнта. Трьома найпоширенішими ускладненнями були інфекція штифтового тракту — 61,3 %, аксіальне відхилення — 43,2 % та затримка зрощення — 25,13 %. Багатовимірний аналіз показав, що довжина кісткового дефекту ($P = 0,02$, $OR = 5,489$), кількість попередніх операцій ($P = 0,003$, $OR = 2,204$) та індекс зовнішньої фіксації ($P = 0,01$, $OR = 1,202$) суттєво корелювали з інфекцією штифтового тракту. Кісткові дефекти середньої третини ($P < 0,001$, $OR = 23,769$), довжина кісткового дефекту ($P < 0,001$, $OR = 2,776$) та індекс зовнішньої фіксації ($P < 0,001$, $OR = 1,154$) суттєво корелювали з аксіальним відхиленням. Довжина кісткового дефекту ($P = 0,003$, $OR = 1,242$), дефекти м'яких тканин ($P = 0,013$, $OR = 0,312$) та кісткові дефекти дистальної третини ($P = 0,023$, $OR = 4,257$) суттєво корелювали із затримкою загоєння. За шкалою ASAMI: рівень відмінних та добрих результатів для кісток 95,48 % і рівень відмінних функціональних результатів 87,94 %

Результати дослідження та їх обговорення

Результати дослідження та висновки наведені в табл. 2.

Найпоширенішими недоліками та ускладненнями при КТ є довготривале використання зовнішньої конструкції, інфекція місця закріплення штифта (65,96 %), аксіальне відхилення (40,78 %), скутість суглоба (23,76 %), стискання м'яких тканин (22,34 %) та затримка зрощення місця стикування (13,48 %) [29].

Тому для зменшення їх кількості метод КТ на сучасному етапі характеризується різноплановими удосконаленнями. Зокрема, набирає популярності трифокальний спосіб КТ, який приводить до швидшої регенерації кістки та скорочення часу лікування порівняно з біфокальним, особливо при великих КД [36, 37].

Зараз спостерігається зростаюча тенденція до застосування модифікованих методів КТ (наприклад, застосування односторонніх зовнішніх фіксаторів або з тканинним клаптем) та комбінованих методів (наприклад, метод Ілізарова з антибіотичним спейсером або внутрішня фіксація) для лікування ДК. Частота зрощення за методом КТ зі спейсером з антибіотиком та інтрамедулярним штифтом при дефектах великогомілкової кістки становила 99,58 % (95% ДІ: 98,05~100,00 %) та 95,02 % (95% ДІ: 87,28~100,00 %) відповідно. При застосуванні методу КТ з інтрамедулярним цвяхом спостерігався нижчий рівень штифтової інфекції, вищий рівень рецидивної інфекції та ампутацій [38].

Окрім цього, при лікуванні КД набуває популярності спосіб КТ за допомогою інтрамедулярної кабельної транспортної системи [39].

Інноваційною технологією КТ при дефектах довгих кісток є транспортування кістки за допомогою магнітних інтрамедулярних стрижнів [40].

Метод ІМ — це відносно нова двохетапна хірургічна процедура для реконструкції сегментарних дефектів кісток, яку запропонував Masquelet в середині 1980-х років. Серед недоліків: потреба в повторних оперативних втручаннях, рецидив гнійно-некротичних процесів, розсмоктування трансплантатів, повільне кісткове зрощення. Позитивні результати при застосуванні методу ІМ становлять близько 86 % проти 95 % при КТ [41].

Так, середньозважені показники ускладнень становлять 25 % для дефектів плечової кістки, 23 % — передпліччя та 41 % — для дефектів кисті [42, 43].

За результатами інших досліджень, методика ІМ демонструє переваги у нижчій вартості госпіталізації, коротшому часі остаточного зрощення до повного навантаження, нижчій частоті ускладнень та кращій післяопераційній якості життя порівняно з методом КТ [44].

Висновок

Метод кісткового транспорту та Masquelet є сучасними найбільш вживаними технологіями при лікуванні пацієнтів з дефектами кісткової тканини. Позитивні результати при застосуванні цих методик становлять близько 86–95 %, що з урахуванням поліструктурних уражень є доволі значущим показником. Кожен метод характеризується своїми позитивними сторонами та недоліками, які зумовлені особливостями його реалізації та тяжкістю пошкодження, що потребує їх застосування за чітко визначеними показаннями.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Автори заявляють про відсутність сторонньої фінансової підтримки даного дослідження.

Внесок авторів. Бур'янов О.А. — концепція і дизайн дослідження; Кваша В.П. — аналіз джерел літератури; Ярмолук Ю.О. — відбір джерел літератури, написання тексту; Пасенко М.С. — систематизація джерел літератури, написання тексту.

Список літератури

1. Tsang S.J., van Rensburg A.J., van Heerden J. et al. The management of critical bone defects: outcomes of a systematic approach. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2024;34(6):3225-3231. doi: 10.1007/s00590-024-04050-1.
2. Грицай М., Колов Г., Сабодош В. та ін. Основні хірургічні методи заміщення критичних дефектів великогомілкової кістки (огляд літератури). Частина II. *Terra orthopaedica.* 2024;2(121):45-53. doi: 10.37647/2786-7595-2024-121-2-45-53.
3. Migliorini F., La Padula G., Torsiello E. et al. Strategies for large bone defect reconstruction after trauma, infections or tumour excision: a comprehensive review of the literature. *Eur J Med Res.* 2021;26:118. doi: 10.1186/s40001-021-00593-9.
4. Rashid S., Azeem S., Riaz S. Adams-Oliver Syndrome: A Rare Congenital Disorder. *Cureus.* 2022;14(3):23297. doi: 10.7759/cureus.23297.
5. Rupp M., Popp D., Alt V. Prevention of infection in open fractures: Where are the pendulums now? *Injury.* 2020;51(2):57-63. doi: 10.1016/j.injury.2019.10.074.
6. Altomare M., Granieri S., Cioffi S.P.B. et al. High-Grade Limbs Open Fractures: Time to Find Milestones in the Emergency Setting. *Life (Basel).* 2021;11(11):1226. doi: 10.3390/life11111226.
7. Benavides J.M., Benavides L.C., Pumiglia L. et al. Breaking point: Musculoskeletal combat injuries in Iraq, Afghanistan, and Syria-Epidemiology and future directions of care on the battlefield after over two decades of war. *J Trauma Acute Care Surg.* 2025;99(3):27-31. doi: 10.1097/TA.0000000000004705.
8. Prat D., Bloch A., Braun M. et al. Do Gunshot and Explosion Injuries Differ in Severity and Management? A Multicenter Study of Upper Extremity Trauma in the 2023 Israel-Gaza Conflict. *Clin Orthop Relat Res.* 2025. doi: 10.1097/CORR.0000000000003618.
9. Brown K.V., Roberts D.C., Wordsworth M. et al. Management of conflict injuries to the upper limb. Part 1: assessment and early surgical care. *The Journal of Hand Surgery.* 2022; European volume 47(7):687-697. <https://doi.org/10.1177/17531934221098916>.
10. Wild H., Stewart B.T., Le Boa C. et al. Epidemiology of Injuries Sustained by Civilians and Local Combatants in Contemporary Armed Conflict: An Appeal for a Shared Trauma Registry Among Humanitarian Actors. *World Journal of Surgery.* 2020;44(6):1863-1873. doi: 10.1007/s00268-020-05428-y.
11. Burianov O., Yarmoliuk Yu., Derkach S. et al. Criteria for predicting risks in the case of replacing an fixator with an internal fixator during the treatment of gunshot fractures of the extremities. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics.* 2023;1:5-9. doi: 10.15674/0030-5987202315-9.
12. Murphy B., Irwin S., Condon F. The 50 most influential papers pertaining to the Ilizarov method: A bibliometric analysis. *Journal of Orthopaedics.* 2022;30:30-35. doi: 10.1016/j.jor.2022.02.010.
13. Masquelet A.C., Giannoudis P.V. The induced membrane technique for treatment of bone defects: What have I learned? *Trauma Case Reports.* 2021;36:100556. doi: 10.1016/j.tcr.2021.100556.
14. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:71. doi: 10.1136/bmj.n71.
15. Kang Y., Wu Y., Ma Y., Jia X., Zhang M., Lin F., Rui Y. Masquelet combined with free-flap technique versus the Ilizarov bone transport technique for severe composite tibial and soft-tissue defects. *Injury.* 2024 Jun;55(6):111521. doi: 10.1016/j.injury.2024.111521.
16. Grün W., Hansen E.J.J., Andreassen G.S. et al. Functional outcomes and health-related quality of life after reconstruction of segmental bone loss in femur and tibia using the induced membrane technique. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023;143(8):4587-4596. doi: 10.1007/s00402-022-04714-9.
17. Mathieu L., Bilichtin E., Durand M. et al. Masquelet technique for open tibia fractures in a military setting. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2020;46(5):1099-1105. doi: 10.1007/s00068-019-01217-y.
18. Fung B., Hoit G., Schemitsch E. et al. The induced membrane technique for the management of long bone defects. *Bone Joint J.* 2020;102-B(12):1723-1734. doi: 10.1302/0301-620X.102B12.BJJ-2020-1125.R1.
19. Hsu C.A., Chen S.H., Chan S.Y. et al. The Induced Membrane Technique for the Management of Segmental Tibial Defect or Nonunion: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Biomed Res Int.* 2020;2020:5893642. doi: 10.1155/2020/5893642.
20. Yoon Y.C., Kim Y., Song H.K. et al. Efficacy of Staged Surgery in the Treatment of Open Tibial Fractures with Severe Soft Tissue Injury and Bone Defect. *Yonsei Med J.* 2022;63(10):915-926. doi: 10.3349/ymj.2022.0078.
21. Chloros G.D., Kanakaris N.K., Harwood P.J. et al. Induced membrane technique for acute bone loss and nonunion management of the tibia. *OTA Int.* 2022;5(2):170. doi: 10.1097/O19.0000000000000170.
22. Kołodziejczyk K., Ropielewski A., Garlewicz R. et al. Clinical Observations of the Effectiveness of the Masquelet Induced Membrane Technique in the Treatment of Critical Long-Bone Defects of the Lower and Upper Extremities. *Medicina (Kaunas).* 2024;60(12):1933. doi: 10.3390/medicina60121933.
23. Tsang S.J., van Rensburg A.J., van Heerden J. et al. The management of critical bone defects: outcomes of a systematic approach. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2024;34(6):3225-3231. doi: 10.1007/s00590-024-04050-1.
24. Shen J., Wei Z., Wang S. et al. Treatment of infected bone defects with the induced membrane technique. *Bone Joint Res.* 2023;12(9):546-558. doi: 10.1302/2046-3758.129.BJR-2022-0439.R2.
25. Wang P., Wu Y., Rui Y. et al. Masquelet technique for reconstructing bone defects in open lower limb fracture: Analysis of the relationship between bone defect and bone graft. *Injury.* 2021;52(4):988-995. doi: 10.1016/j.injury.2020.12.009.
26. Özpolat N., Tunçez M., Reisoğlu A. et al. Management of tibial non-unions with Masquelet technique after failed previous treatment options for Grade III open fractures. *Ulus Trav-*

ma Acil Cerrahi Derg. 2022;28(8):1180-1185. doi: 10.14744/tjtes.2021.36768.

27. Lu Y., Wang Q., Ren C. et al. Proximal versus distal bone transport for the management of large segmental tibial defect: a clinical case series. *Sci Rep.* 2023;13:3883. doi: 10.1038/s41598-023-31098-6.

28. Qian Wang, Teng Ma, Zhong Li et al. Bone transport combined with sequential nailing technique for the management of large segmental bone defects after trauma. *Sec. Orthopedic Surgery.* 2024;11. doi: 10.3389/fsurg.2024.1302325.

29. Liu Y., Yushan M., Liu Z. et al. Complications of bone transport technique using the Ilizarov method in the lower extremity: a retrospective analysis of 282 consecutive cases over 10 years. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020;21:354. doi: 10.1186/s12891-020-03335-w.

30. Kinik H., Kalem M. Ilizarov segmental bone transport of infected tibial nonunions requiring extensive debridement with an average distraction length of 9,5 centimetres. Is it safe? *Injury.* 2021;52(8):2425-2433. doi: 10.1016/j.injury.2019.12.025.

31. Liu K., Jia Q., Wang X. et al. Complications associated with single-level bone transport for the treatment of tibial bone defects caused by fracture-related infection. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24(1):514. doi: 10.1186/s12891-023-06527-2.

32. Xie J., Zhao G., Yasheng T. et al. Ilizarov bone transport to treat infected nonunion of long bones: a multicenter retrospective cohort study. *J Int Med Res.* 2021;49(3):3000605211002701. doi: 10.1177/03000605211002701.

33. Shi B., Zhang Z., Ji G. et al. Bone Transport for Large Segmental Tibial Defects Using Taylor Spatial Frame versus the Ilizarov Circular Fixator. *Orthop Surg.* 2024;16(9):2157-2166. doi: 10.1111/os.14192.

34. Huang Q., Ren C., Li M. et al. Antibiotic calcium sulfate-loaded hybrid transport versus traditional Ilizarov bone transport in the treatment of large tibial defects after trauma. *J Orthop Surg Res.* 2021;16(1):568. doi: 10.1186/s13018-021-02723-9.

35. Feng D., Zhang Y., Jia H. et al. Complications analysis of Ilizarov bone transport technique in the treatment of tibial bone defects — a retrospective study of 199 cases. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24(1):864. doi: 10.1186/s12891-023-06955-0.

36. Yang X., Hamiti Y., Liu K. et al. Optimizing bone transport strategies: a pixel value ratio-based evaluation of regeneration rates in bifocal and trifocal techniques. *Front Surg.* 2024;11:1494658. doi: 10.3389/fsurg.2024.1494658.

37. Hamiti Y., Abudureyimu P., Lyu G. et al. Trifocal versus Pentafocal bone transport in segmental tibial defects: a matched comparative analysis for posttraumatic osteomyelitis treatment. *M.BMC Musculoskelet Disord.* 2024;25(1):383. doi: 10.1186/s12891-024-07507-w. PMID: 38750523.

38. Xie L., Huang Y., Zhang L. et al. Ilizarov method and its combined methods in the treatment of long bone defects of the lower extremity: systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24(1):891. doi: 10.1186/s12891-023-07001-9.

39. Rosteijs T., Pätzholz S., Rausch V. et al. Ilizarov bone transport using an intramedullary cable transportation system in the treatment of tibial bone defects. *Injury.* 2021;52(6):1606-1613. doi: 10.1016/j.injury.2020.12.028.

40. Summers S., Krkovic M. Bone transport with magnetic intramedullary nails in long bone defects. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2021 Aug;31(6):1243-1252. doi: 10.1007/s00590-020-02854-5.

41. Alford A.I., Nicolaou D., Hake M. et al. Masquelet's induced membrane technique: Review of current concepts and future directions. *J Orthop Res.* 2021;39(4):707-718. doi: 10.1002/jor.24978.

42. O'Connor C.M., Perloff E., Drinane J. et al. An Analysis of Complications and Bone Defect Length With the Use of Induced Membrane Technique in the Upper Limb: A Systematic Review. *Hand (NY).* 2022;17(3):572-577. doi: 10.1177/1558944720918368.

43. Pederiva D., De Luca L., Faldini C. et al. Masquelet's induced membrane technique in the upper limb: a systematic review of the current outcomes. *J Orthop Traumatol.* 2025 Jan 27;26(1):4. doi: 10.1186/s10195-024-00815-w.

44. Ren C., Li M., Ma T. et al. A meta-analysis of the Masquelet technique and the Ilizarov bone transport method for the treatment of infected bone defects in the lower extremities. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2022;30(2):10225536221102685. doi: 10.1177/10225536221102685.

Отримано/Received 02.09.2025

Рецензовано/Revised 15.09.2025

Прийнято до друку/Accepted 08.10.2025

Information about authors

Olexandr A. Burianov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kaftaum@ukr.net; fax: +380 (44) 288-01-26; phone: +380 (67) 796-68-76; <https://orcid.org/0000-0002-2174-1882>

Volodymyr P. Kvasha, MD, DSc, PhD, Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: vlkvasha@ukr.net; phone: +380 (50) 381-65-57; <https://orcid.org/0000-0002-7444-6289>

Yurii O. Yarmoliuk, MD, DSc, PhD, Colonel of the Medical Service, Chief Traumatologist of the Ukraine Armed Forces, Head of the Injury Clinic, National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine; e-mail: yuo1707@gmail.com; phone: +380 (67) 791-69-28; Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0003-1971-9683>

Maksym S. Pasenko, PhD-student, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: pasenkom91@gmail.com; phone: +380 (66) 152-69-03; <https://orcid.org/0000-0003-1281-5170>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. The authors declared that this study has received no financial support.

Authors' contribution. O.A. Burianov — research concept and design; V.P. Kvasha — analysis of literary sources; Yu.O. Yarmoliuk — selection of literature sources, writing the text; M.S. Pasenko — systematization of literary sources, writing text.

O.A. Burianov¹, V.P. Kvasha¹, Yu.O. Yarmoliuk^{1,2}, M.S. Pasenko¹

¹Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

²National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine

Modern technologies for replacing bone tissue defects (bone transport, Masquelet): literature review and meta-analysis

Abstract. Background. Bone defects are a pathological condition characterized by a loss of bone tissue volume that cannot be restored independently even with adequate measures and surgical stabilization. In the literature, this condition is described as a critical defect: length over 2 cm and bone mass loss over 50 %. Bone defects are divided into primary or secondary ones and are the result of a fairly wide range of factors: tumors of the musculoskeletal system, infections, high-energy injuries, osteofibrous dysplasias, or congenital defects (Adams-Oliver syndrome). With the beginning of full-scale aggression, combat injuries (fire and mine-explosive), which arise as a result of high-energy combined effects and lead to polystructural damage, became the main factor in both primary and secondary bone defects. Objective: to compare the clinical outcomes of using the Masquelet technique and bone transport in the treatment of patients with segmental defects of the long bones of the extremities. **Materials and methods.** In two databases (PubMed, Embase), the current literature was analyzed on the treatment of defects of long tubular bones from 2016 to 2025 with the help of the Ilizarov method (bone transport) and Masquelet technique (induced membrane) using the keywords: bone defect, nonunion, bone transport, Masquelet method, complications. **Results.** The most common disadvantages and com-

plications of bone transport are long-term use of the external fixation device, infection of the pin site (65.96 %), axial deviation (40.78 %), joint stiffness (23.76 %), soft tissue compression (22.34 %), and delayed fusion of the junction (13.48 %). To reduce their number, various improvements have been proposed. In particular, the trifocal method, the use of unilateral external devices with intramedullary fixators, intramedullary cable transport, and bone transport using magnetic intramedullary rods are gaining popularity. Positive results when using the Masquelet method are about 86 versus 95 % with bone transport, but it demonstrates advantages in lower hospitalization costs, shorter time from final union to full load, lower complication rates, and better post-operative quality of life. **Conclusions.** Bone transport and Masquelet method are the most widely used modern techniques in the treatment of patients with bone defects. Positive results with the use of these techniques are about 86–95 %, which is quite significant considering polystructural lesions. Each method is characterized by advantages and disadvantages, which are determined by the specifics of its implementation and the severity of the injury, which requires the use according to clearly defined indications.

Keywords: bone defect; nonunion; bone transport; Masquelet method; complications

Для нотаток



AKSİMED
КЛІНІКА СУЧАСНОЇ НЕВРОЛОГІЇ

РЕАБІЛІТАЦІЯ ПІСЛЯ ІНСУЛЬТІВ І ТРАВМ

НЕВРОЛОГІЧНА КЛІНІКА "АКСІМЕД"

ВУЛ. ТУМАНЯНА, 3 • AKSIMED.UA

(044) 390-00-55

20 РОКІВ
ДОСВІДУ



САМОЛІКУВАННЯ МОЖЕ БУТИ ШКІДЛИВИМ ДЛЯ ВАШОГО ЗДОРОВ'Я



*“Аксімед”
завжди
попереду!*

НА БАЗІ КЛІНІКИ “АКСІМЕД” ФУНКЦІОНУЄ

ЦЕНТР ПРОБЛЕМ СНУ

ЕФЕКТИВНА ДІАГНОСТИКА ТА ЛІКУВАННЯ:

- порушень дихання уві сні (нічне апное);
- усіх видів безсоння;
- синдрому неспокійних ніг.

ПРОВДИМО НАЙСУЧАСНІШУ
ПОЛІСОМНОГРАФІЮ



ЛІКУВАННЯ
ХРАПУ



AKSIMED.UA • 044 390 00 55