



Результати клінічного випробування остеосинтезу шийки плечової кістки імплантатами з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу

М. Л. Головаха¹, В. В. Чорний²

Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Україна

A – концепція та дизайн дослідження; B – збір даних; C – аналіз та інтерпретація даних; D – написання статті; E – редагування статті; F – остаточне затвердження статті

Метали, які використовують для виготовлення різних імплантатів для травматології, мають всі необхідні механічні властивості, але ці матеріали здатні окислюватись. Вуглець-вуглецеві композитні матеріали проникні для рентгенівських променів, легко піддаються механічній обробці. Їх успішно використовують при остеосинтезі й ендопротезуванні кісткових структур завдяки комплексу необхідних фізико-механічних і хімічних властивостей.

Мета роботи – порівняльний аналіз результатів лікування пацієнтів із переломами проксимальної частини плечової кістки пластинами з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу та з титану.

Матеріали та методи. У дослідженні використовували пластину з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу для остеосинтезу проксимальної частини плеча. В пацієнтів із групи порівняння застосовували пластину з титану. У групу дослідження залучили 20 пацієнтів, у групу порівняння – 15 осіб. Аналіз результатів виконали, використавши шкалу Constant–Murley та опитувальник Quick DASH.

Результати. Порівняльне дослідження результатів лікування пацієнтів з основної та групи порівняння показало більш виражений позитивний ефект від лікування у групі, де здійснили остеосинтез шийки плечової кістки пластиною з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу, на 3, 6 та 12 місяці спостереження внаслідок зменшення болювого синдрому у плечі та проявів порушення функції – визначили покращення повсякденної діяльності, підвищення якості життя.

Висновки. Аналіз віддалених результатів лікування проксимальних переломів плечової кістки пластиною з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу та титану, одержаних за допомогою шкали Constant–Murley та опитувальника Quick DASH, показав статистично підтвержене покращення функції плечових суглобів, зівставне для цих методів.

Ключові слова: остеосинтез, переломи шийки плечової кістки, кісткові пластини, хірургічне лікування.

Актуальні питання фармацевтичної і медичної науки та практики. 2023. Т. 16, № 3(43). С. 254-259

Results of a clinical trial of humeral neck osteosynthesis with carbon – carbon composite material

M. L. Holovakha, V. V. Chorny

The metals utilized in the production of various implants in traumatology possess all the required mechanical properties. However, these materials are susceptible to oxidation. Carbon-carbon composites, on the other hand, exhibit X-ray transparency and are easily machinable. Thanks to their intricate yet essential physical, mechanical, and chemical properties, they find effective application in osteosynthesis and endoprosthesis procedures for bone structures.

The aim of this study is to comparative view of the treatment outcomes for patients with fractures of the proximal part of the humerus by carbon-carbon composite material plates and titanium plates.

Materials and methods. In this study, a carbon-carbon composite material plate was conducted osteosynthesis of the proximal part of the shoulder. In the comparison group, a titanium plate was employed. The study group comprised 20 patients, while the comparison group included 15 patients. The analysis of the results was carried out utilizing the Constant–Murley scale and the Quick DASH questionnaire.

Results. A comparative study of treatment outcomes between the main and comparison groups revealed a more significant positive treatment effect in the group that underwent osteosynthesis of the humeral neck by a carbon-carbon composite material plate. This effect was observed at the 3-month, 6-month, and 12-month evaluation points. It was characterized by reduced shoulder pain, alleviated dysfunction manifestations, enhanced daily activities, and improved overall quality of life among patients in this group.

ARTICLE INFO



<http://pharmed.zsmu.edu.ua/article/view/286567>

UDC 616.717.42-001.5-089.2-089.843-77-071
DOI: [10.14739/2409-2932.2023.3.286567](https://doi.org/10.14739/2409-2932.2023.3.286567)

Current issues in pharmacy and medicine: science and practice, 2023. 16(3), 254-259

Key words: osteosynthesis fracture, shoulder fractures, bone plates, surgery treatment.

*E-mail: golovahaml@gmail.com

Received: 28.08.2023 // Revised: 15.09.2023 // Accepted: 25.09.2023

Conclusions. The analysis of long-term treatment outcomes for proximal humerus fractures, utilizing both carbon-carbon composite material plates and titanium plates, by the Constant–Murley scale and the Quick DASH questionnaire, demonstrated statistically confirmed improvements in shoulder joint function for both treatment methods.

Key words: osteosynthesis fracture, shoulder fractures, bone plates, surgery treatment.

Current issues in pharmacy and medicine: science and practice, 2023. 16(3), 254-259

У сучасній травматології та ортопедії все більше уваги приділяють використанню алопластичних матеріалів при переломах кісток та під час органозберігальних операцій, що потребують заміщення дефектів після резекції пухлин. Широко застосовують різноманітні імплантати, якими здійснюють протезування при великих дефектах довгих кісток, адже вони дають змогу не тільки зберегти кінцівку, але й відновити її функцію [12,13].

Вуглецеві матеріали, зокрема вуглець-вуглецеві композитні матеріали, є відносно новими конструкційними матеріалами для імплантації [4,9]. Їх успішно використовують при остеосинтезі й ендопротезуванні кісткових структур завдяки комплексу необхідних фізико-механічних і хімічних властивостей. Зауважимо, що за окремими з них вони перевершують традиційні металеві та полімерні імплантати [1,7].

Вуглець-вуглецеві композитні матеріали проникні для рентгенівських променів, піддаються механічній обробці [2,11]; вони не іонізуються при опроміненні та не є джерелом вторинного випромінювання, і це дає змогу провести курси післяопераційної променевої терапії [3,8]. Комбінований остеосинтез із використанням вуглецевих фіксаторів особливо ефективний, коли діагностовано остеопороз, патологічні переломи [5,6].

Доведено, що вуглець-вуглецевий матеріал є біоінертним. Це підтверджено відсутністю клітинної реакції навколо вуглецевих фрагментів [10,14].

За результатами попередніх експериментальних досліджень, можливе використання розробленого матеріалу на основі вуглець-вуглецевого композитного матеріалу для імплантації в живий організм. Для клінічної апробації обрали пластину з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу для остеосинтезу перелому проксимального відділу плеча [15,16].

Мета роботи

Порівняльний аналіз результатів лікування пацієнтів із переломами проксимальної частини плечової кістки пластинами з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу та з титану.

Матеріали і методи дослідження

У дослідження залучили 35 пацієнтів, які перебували на лікуванні з грудня 2020 року до червня 2022 року на клінічних базах кафедри травматології та ортопедії Запорізького державного медичного університету. У вибірці пацієнтів 5 (14,3 %) чоловіків і 30 (85,7 %) жінок. Середній вік пацієнтів становив 62 [48; 70] роки. Ураження кінцівки, що домінує, виявили в 53 % випадків. У

групі дослідження 20 пацієнтам проведено остеосинтез проксимальної частини плеча пластиною з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу. Структура груп пацієнтів за віком і статтю наведена в таблиці 1.

Усім пацієнтам здійснили клінічне, лабораторне й інструментальне обстеження, протипоказань для оперативного втручання не виявили. Хворим здійснили комплексне лікування, спрямоване на відновлення функції плечового суглоба. Терапія передбачала хірургічне втручання з остеосинтезу шийки плечової кістки, надалі – комплекс реабілітаційних заходів, ідентичний для пацієнтів обох груп спостереження, зокрема ортопедичний режим і дотримання певного обсягу рухової активності. Крім того, призначали консервативну терапію відповідно до локальних протоколів ведення патології.

Оцінювання функціонального статусу пацієнтів і вплив больового синдрому в плечових суглобах на порушення життєдіяльності в післяопераційному періоді на 3, 6 і 12 місяць після остеосинтезу шийки плечової кістки здійснили, застосувавши шкалу Constant–Murley та опитувальник Quick DASH.

Під час роботи використали клінічні та рентгенологічні методи дослідження, виконали порівняльний аналіз результатів лікування. Статистично числові показники опрацювали за допомогою програм Microsoft Office Excel 2010 та Statistica for Windows 13 (StatSoft Inc., № JРZ804I382130ARCН10-J). Дані описової статистики наведено як середнє значення ± стандартна похибка. Достовірність відмінностей результатів оцінювали за допомогою t-критерію Стьюдента, вірогідними розбіжності вважали на рівні не менше ніж 95 % – $p < 0,05$.

Результати

Оцінювання функціонального статусу пацієнтів і впливу больового синдрому в плечових суглобах на порушення життєдіяльності в післяопераційному періоді на 3, 6 та 12 місяць після остеосинтезу шийки плечової кістки, здійснене за допомогою шкали Constant–Murley, показало значущі відмінності між групами хворих.

За результатами розділу шкали Constant–Murley, що визначає больовий синдром (2 запитання, максимальна кількість балів – 15), на третій місяць після остеосинтезу шийки плечової кістки зафіксовано високий рівень болю в обох групах пацієнтів: 7 [5; 10] балів у групі порівняння, 8 [6; 8] – у групі дослідження ($p = 0,0343$). У групі дослідження спостерігали більш виражене зменшення болю під час опитування на шостому місяці. Оцінивши результати опитування, що одержали на шостому місяці після остеосинтезу шийки плечової кістки, виявили зменшення больового синдрому: у групі порівняння – 10,00

Таблиця 1. Демографічні показники пацієнтів із груп спостереження

Група спостереження	До 50 років		Від 50 до 60 років		Від 60 до 70 років		Понад 70		Загалом
	Чол.	Жін.	Чол.	Жін.	Чол.	Жін.	Чол.	Жін.	
Група порівняння	1 (6,7 %)	–	–	6 (40,0 %)	1 (6,7 %)	4 (26,6 %)	–	3 (20,0 %)	15
Група дослідження	1 (5 %)	2 (10 %)	1 (5 %)	3 (15 %)	1 (5 %)	5 (25 %)	–	7 (35 %)	20

Таблиця 2. Результати оцінювання больового синдрому в пацієнтів за шкалою Constant–Murley

Група спостереження	Через 3 місяці	Через 6 місяців	Через 12 місяців
Група порівняння	7,00 [5,00; 10,00]	10,00 [10,00; 12,75]	12,00 [12,00; 14,00]
Група дослідження	8,00 [6,00; 8,00]	10,00 [8,00; 10,00]	12,00 [10,00; 13,00]
p	0,0343	0,0224	0,3953

Таблиця 3. Оцінювання побутової активності в пацієнтів за шкалою Constant–Murley

Група спостереження	Через 3 місяці	Через 6 місяців	Через 12 місяців
Група порівняння	11 [9; 13]	14 [14; 15]	14 [14; 16]
Група дослідження	13 [11; 13]	15 [15; 16]	16 [15; 17]
p	0,0343	0,0278	0,0118

Таблиця 4. Оцінювання обсягу рухів у пацієнтів за шкалою Constant–Murley

Група спостереження	Через 3 місяці	Через 6 місяців	Через 12 місяців
Група порівняння	15,0 [12,0; 17,5]	20,0 [20,0; 24,0]	22,0 [22,0; 22,5]
Група дослідження	18,0 [18,0; 20,0]	24,0 [24,0; 26,0]	26,0 [26,0; 28,0]
p	0,0016	0,0015	0,0066

[10,00; 12,75] бала, у групі дослідження – 10,00 [8,00; 10,00] ($p = 0,0224$). Порівнявши результати на дванадцятий місяць після операції, зареєстрували поліпшення показників: у групі порівняння – 12 [12; 14] балів, у групі дослідження – 12 [10; 13] ($p = 0,3953$). Проаналізували показники, що отримали на 3, 6 та 12 місяці за ознакою больовий синдром, виявили зіставні результати у групах спостереження, але більш вираженим було зменшення болю в групі дослідження (табл. 2).

Аналіз розділу шкали Constant–Murley, що визначає побутову активність (4 запитання, максимальна кількість балів – 20), на третій місяць після остеосинтезу шийки плечової кістки показав зменшення професійної та побутової діяльності в обох групах пацієнтів: 11 [9; 13] балів у групі порівняння, 13 [11; 13] – у групі дослідження ($p = 0,0343$). В обох групах визначили низький рівень піднесення руки, що не викликало біль, під час опитування на третьому місяці. Оцінивши результати на шостому місяці після остеосинтезу шийки плечової кістки, виявили зменшення больового синдрому вночі: у групі порівняння – 14 [14; 15] балів, у групі дослідження – 15 [15; 16] ($p = 0,0278$). Порівнюючи результати на дванадцятому місяці після операції, визначили покращення, що в групі порівняння становило 14 [14; 16] балів, у групі дослідження – 16 [15; 17] балів ($p = 0,0118$) (табл. 3). Аналізуючи результати, що

встановили в групі дослідження на 3, 6 та 12 місяці за розділом, який характеризує побутову активність, одержали зіставні дані з групою порівняння, втім, зауважили вищу функціональність плечового суглоба.

Під час аналізу розділу шкали Constant–Murley, що характеризує обсяг рухів (4 запитання, максимальна кількість балів – 40), на третьому місяці після остеосинтезу шийки плечової кістки встановили зменшення зовнішньої ротації та переднього згинання в обох групах пацієнтів: 15,0 [12,0; 17,5] бала в групі порівняння, 18,0 [18,0; 20,0] бала у групі дослідження ($p = 0,0016$). В обох групах визначили низький рівень відведення плеча та внутрішньої ротації. Аналізуючи результати на шостому місяці після остеосинтезу шийки плечової кістки, виявили покращення зовнішньої ротації та відведення плеча, що в групі дослідження становило 20 [20; 24] балів, у групі дослідження – 24 [24; 26] ($p = 0,0015$). Порівнявши результати на дванадцятому місяці після операції, визначили покращення обсягу рухів в обох групах: 22,0 [22,0; 22,5] бала у групі порівняння, 26,0 [26,0; 28,0] бала – у групі дослідження ($p = 0,0066$) (табл. 4). Під час аналізу даних, що одержали у групах спостереження на 3, 6 та 12 місяці за розділом, який визначає побутову активність, встановили схожі результати за групами, але більший обсяг рухів зафіксували в пацієнтів групи дослідження.

Таблиця 5. Оцінювання м'язової сили пацієнтів за шкалою Constant–Murley

Група спостереження	Через 3 місяці	Через 6 місяців	Через 12 місяців
Група порівняння	10,0 [10,0; 13,5]	12,0 [12,0; 14,0]	14,0 [14,0; 16,0]
Група дослідження	8,0 [8,0; 10,0]	12,0 [10,0; 12,0]	14,0 [12,0; 14,0]
p	0,0009	0,0668	0,0565

Таблиця 6. Оцінювання функціонального статусу пацієнтів за шкалою Constant–Murley – загальні результати

Група спостереження	Через 3 місяці	Через 6 місяців	Через 12 місяців
Група порівняння	41,0 [40,0; 50,5]	57,0 [56,0; 64,5]	63,0 [62,0; 71,0]
Група дослідження	46,0 [45,0; 49,0]	61,0 [59,0; 64,0]	68,0 [65,0; 70,0]
p	0,0492	0,0719	0,0150

Таблиця 7. Оцінювання функціонального статусу пацієнтів за опитувальником Quick DASH

Група спостереження	Через 3 місяці	Через 6 місяців	Через 12 місяців
Група порівняння	19,32 [16,48; 25,00]	14,77 [11,93; 15,91]	6,82 [6,82; 9,09]
Група дослідження	15,91 [15,91; 27,27]	13,64 [11,36; 13,64]	6,82 [4,55; 9,09]
p	0,3771	0,1252	0,1880

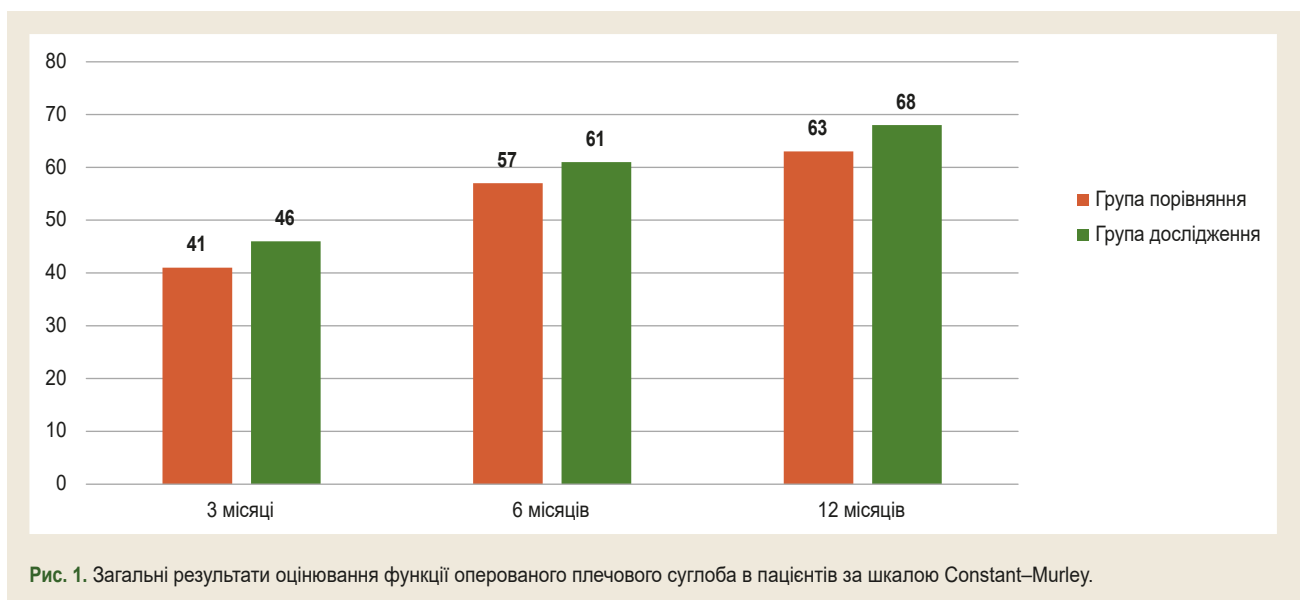


Рис. 1. Загальні результати оцінювання функції оперованого плечового суглоба в пацієнтів за шкалою Constant–Murley.

Останній розділ шкали Constant–Murley визначає м'язову силу (1 запитання, 3 спроби, максимальна кількість балів – 25). У результаті аналізу даних, що одержали, зафіксували позитивні зміни на дванадцятому місяці спостереження порівняно з шостим. На третій місяць після остеосинтезу шийки плечової кістки у групі порівняння результат за цим розділом становив 10,0 [10,0; 13,5] бала, у групі дослідження – 8,0 [8,0; 10,0] бала ($p = 0,0009$). На шостий місяць оцінювання м'язової сили дало такі результати: 12 [12; 14] балів у групі порівняння, 12 [10; 12] – у групі дослідження, різниця між групами статистично невірогідна ($p = 0,0668$). На дванадцятому місяці в групі порівняння м'язову силу оцінили як 14 [14; 16]

балів, у групі дослідження – 14 [12; 14]; відмінності також статистично недостовірні ($p = 0,0565$) (табл. 5).

Аналіз загальних результатів за шкалою Constant–Murley (11 запитань, максимальна кількість балів – 100) (рис. 1, табл. 6) на третьому місяці після остеосинтезу шийки плечової кістки показав, що пацієнти обох груп мали труднощі з виконанням звичайних дій у повсякденному житті: 41,0 [40,0; 50,5] бала в групі порівняння, 46,0 [45,0; 49,0] – групі дослідження. Відмінності статистично невірогідні ($p = 0,0492$).

Оцінивши результати на шостий місяць після остеосинтезу шийки плечової кістки, зареєстрували збільшення загальної кількості балів: у групі порівняння – 57,0

[56,0; 64,5] бала, у групі дослідження – 61,0 [59,0; 64,0] ($p = 0,0719$). Порівнюючи результати на дванадцятому місяці після операції, визначили наступне поліпшення якості функціональності плечового суглоба: у групі порівняння – 63 [62; 71] бали, у групі дослідження – 68 [65; 70] ($p = 0,0150$). Проаналізувавши дані, що одержали на 3, 6 та 12 місяці, у групі дослідження зафіксували більшу кількість балів. Це свідчить про вищу якість функціонування плечового суглоба у цих пацієнтів порівняно з хворими групи порівняння (табл. 6).

Аналіз результатів, що одержали при використанні опитувальника Quick DASH, здійснили за допомогою офіційної розрахункової таблиці. Сформувавши загальний індекс – середнє значення балів за розділами опитувальника, визначене за спеціальною формулою. Під час опитування через 3 місяці після остеосинтезу шийки плечової кістки виявили тенденцію до зростання показників. Це свідчить про збільшення обсягу рухів та активності прооперованої кінцівки, покращення повсякденної діяльності та поліпшення якості життя. На третьому місяці у контрольній групі за опитувальником Quick DASH визначили 19,32 [16,48; 25,00] бала, у групі дослідження – 15,91 [15,91; 27,27] ($p = 0,3771$). Опитування під час контрольного візиту через 6 місяців після операції також показало покращення показників за кожним із розділів. Результати зіставні у групах пацієнтів: у групі порівняння – 14,77 [11,93; 15,91] бала, у групі дослідження – 13,64 [11,36; 13,64] ($p = 0,1252$). Аналіз показників за шкалою Quick DASH на дванадцятому місяці після операції зафіксував зіставні результати в групах спостереження: у групі порівняння – 6,82 [6,82; 9,09] бала, у групі дослідження – 6,82 [4,55; 9,09] бала, різниця невірогідна ($p = 0,1880$) (табл. 7).

Обговорення

Порівняльне дослідження результатів, що одержали за опитувальником Quick DASH, показало більш виражений позитивний ефект від лікування у пацієнтів із групи, де здійснили остеосинтез шийки плечової кістки пластиною з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу. Цей сприятливий вплив зафіксували під час оцінювання на 3 і 6 місяці за зменшенням больового синдрому в плечі та проявів захворювання, покращенням повсякденної діяльності, поліпшенням якості життя.

У результаті дослідження встановили, що головною скаргою пацієнтів із переломом шийки плеча є біль, що спричиняє обмеження функціональної активності. Так, на третьому місяці спостереження загальна сума балів за опитувальником Constant–Murley у групі порівняння становила 41,0 [40,0; 50,5], а в групі дослідження – 46,0 [45,0; 49,0] ($p = 0,0492$).

Оцінювання віддалених результатів (12 місяців після операції) показало, що в разі застосування пластины і з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу, і з титану спостерігають незначне зменшення активної передньої елевації та внутрішньої ротації з дещо більшим обмеженням при остеосинтезі проксимальної частини плечової

кістки пластиною з титану. Разом із тим, при застосуванні пластины з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу визначили збільшення обсягу зовнішньої ротації плеча при приведенні та відведенні порівняно з використанням пластины з титану.

Результати, що отримали, підтверджують клінічно значущі переваги відновлення функції плечового суглоба при переломах проксимальної частини плечової кістки шляхом застосування пластины з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу порівняно з пластиною з титану.

Висновки

Аналіз віддалених результатів лікування проксимальних переломів плечової кістки пластиною з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу та титану за допомогою шкали Constant–Murley та опитувальника Quick DASH показав однакове для обох методів статистично підтвержене покращення функції плечових суглобів.

Перспективи подальших досліджень полягають у продовженні дослідження біоінтеграції та регенерації кістки з використанням вуглець-вуглецевих композитних матеріалів. Плануємо вивчити співвідношення остеоцитів, остеобластів та остеокластів у регенераті, відносну площу та співвідношення окремих структур регенерату.

Фінансування

Дослідження виконане в рамках НДР Запорізького державного медико-фармацевтичного університету: «Сучасні методи лікування та діагностики пацієнтів з ушкодженнями та захворюваннями опорно-рухового апарату», держреєстрація № 0123U100213 (2023–2027).

Конфлікт інтересів: відсутній.

Conflicts of interest: authors have no conflict of interest to declare.

Відомості про авторів:

Головаха М. Л., д-р мед. наук, професор, зав. каф. травматології та ортопедії, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Україна.

ORCID ID: 0000-0003-2835-9333

Чорний В. В., асистент каф. травматології та ортопедії, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Україна.

ORCID ID: 0000-0003-0902-7616

Information about the authors:

Holovakha M. L., MD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Ukraine.

Chorniy V. V., MD, Assistant of the Department of Traumatology and Orthopedics, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Ukraine.

References

1. Mînzatu, V., Davidescu, C. M., Negrea, P., Ciopec, M., Munteanu, C., Hulka, I., Paul, C., Negrea, A., & Duțeanu, N. (2019). Synthesis, Characterization and Adsorptive Performances of a Composite Material Based on Carbon and Iron Oxide Particles. *International journal of molecular sciences*, 20(7), 1609. <https://doi.org/10.3390/ijms20071609>

2. Delaney, F. T., Denton, H., Dodds, M., & Kavanagh, E. C. (2021). Multimodal imaging of composite carbon fiber-based implants for orthopedic spinal fixation. *Skeletal radiology*, 50(5), 1039-1045. <https://doi.org/10.1007/s00256-020-03622-6>
3. Cofano, F., Di Perna, G., Monticelli, M., Marengo, N., Ajello, M., Mammì, M., Vercelli, G., Petrone, S., Tartara, F., Zenga, F., Lanotte, M., & Garbossa, D. (2020). Carbon fiber reinforced vs titanium implants for fixation in spinal metastases: A comparative clinical study about safety and effectiveness of the new "carbon-strategy". *Journal of clinical neuroscience*, 75, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.03.013>
4. Nurettin, D., & Burak, B. (2018). Feasibility of carbon-fiber-reinforced polymer fixation plates for treatment of atrophic mandibular fracture: A finite element method. *Journal of crano-maxillo-facial surgery*, 46(12), 2182-2189. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.09.030>
5. Samiezhadeh, S., Schemitsch, E. H., Zdero, R., & Bougherara, H. (2020). Biomechanical Response under Stress-Controlled Tension-Tension Fatigue of a Novel Carbon Fiber/Epoxy Intramedullary Nail for Femur Fractures. *Medical engineering & physics*, 80, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2020.04.001>
6. Elgali, I., Omar, O., Dahlin, C., & Thomsen, P. (2017). Guided bone regeneration: materials and biological mechanisms revisited. *European journal of oral sciences*, 125(5), 315-337. <https://doi.org/10.1111/eos.12364>
7. Baba, K., Mikhailov, A., & Sankai, Y. (2019). Long-term safety of the carbon fiber as an implant scaffold material. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference*, 2019, 1105-1110. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856629>
8. Wang, L., Li, G., Ren, L., Kong, X., Wang, Y., Han, X., Jiang, W., Dai, K., Yang, K., & Hao, Y. (2017). Nano-copper-bearing stainless steel promotes fracture healing by accelerating the callus evolution process. *International journal of nanomedicine*, 12, 8443-8457. <https://doi.org/10.2147/IJN.S146866>
9. Dedukh, N. V., Karpinsky, M. J., Chzhou, L., & Malyskhina, S. V. (2016). Regeneratsiya i mekhanicheskaya prochnost kosti v usloviyakh implantatsii uglerodnogo materiala [Regeneration and mechanical strength of bone in the implantation conditions of carbon material]. *Ortopediya, travmatologiya i protezirovaniye*, (3), 41-47. [in Russian]. <https://doi.org/10.15674/0030-59872016341-47>
10. Korzh, N. A., Dedukh, N. V., Tyazhelov, A. A., & Chzhou, L. (2017) Eksperimentalno-klinicheskoe issledovanie primeneniya uglerodnykh biomaterialov v ortopedii i travmatologii (obzor literatury) [Experimental clinical study of the use of carbon biomaterials in orthopedics and traumatology (literature review)]. *Ortopediya, travmatologiya i protezirovaniye*, (2), 114-121. [in Russian]. <https://doi.org/10.15674/0030-598720172114-121>
11. Teuben, M. P. J., Hofman, M., Shehu, A., Greven, J., Qiao, Z., Jensen, K. O., Hildebrand, F., Pfeifer, R., & Pape, H. C. (2020). The impact of intramedullary nailing on the characteristics of the pulmonary neutrophil pool in rodents. *International orthopaedics*, 44(3), 595-602. <https://doi.org/10.1007/s00264-019-04419-6>
12. Shiels, S. M., Bouchard, M., Wang, H., & Wenke, J. C. (2018). Chlorhexidine-releasing implant coating on intramedullary nail reduces infection in a rat model. *European cells & materials*, 35, 178-194. <https://doi.org/10.22203/eCM.v035a13>
13. Danoff, J. R., Aurégan, J. C., Coyle, R. M., Burky, R. E., & Rosenwasser, M. P. (2016). Augmentation of Fracture Healing Using Soft Callus. *Journal of orthopaedic trauma*, 30(3), 113-118. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000481>
14. Barabás, R., de Souza Ávila, E., Ladeira, L., Antônio, L., Tötös, R., Simedru, D., Bizo, L., & Cadar, O. (2019). Graphene Oxides/Carbon Nanotubes–Hydroxyapatite Nanocomposites for Biomedical Applications. *Arabian journal for science and engineering*, 45(1), 219-227. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04058-4>
15. Wright, Z. M., Arnold, A. M., Holt, B. D., Eckhart, K. E., & Sydlík, S. A. (2019). Functional Graphenic Materials, Graphene Oxide, and Graphene as Scaffolds for Bone Regeneration. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*, 5(2), 190-209. <https://doi.org/10.1007/s40883-018-0081-z>
16. Shin, Y. C., Song, S. J., Jeong, S. J., Kim, B., Kwon, I. K., Hong, S. W., Oh, J. W., & Han, D. W. (2018). Graphene-Based Nanocomposites as Promising Options for Hard Tissue Regeneration. *Advances in experimental medicine and biology*, 1078, 103-117. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0950-2_6