

УДК 616.71-001.5; 611.018.4

Людмила КОКІДЬКО, завідувач лабораторії,

Наталія МАНІЧЕВА, к.т.н., доцент,

Нікіта ЯКИМЕНКО, студент

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, e-mail: maxmax899@gmail.com,  
vmanichev@ukr.net, akimenkonikita02@gmail.com

## ЗМІНИ В КІСТКОВИХ ТКАНИНАХ ПРИ ТРАВМАХ ТА ПЕРЕЛОМАХ

**Анотація.** У цій роботі представлені основи механічних властивостей кісток та особливості зміни їх при переломах. Кістка – це природний композитний матеріал, що складається з клітинного та додаткового компонентів. Вона складається з кортикальної та трабекулярної кісток. Кістка адаптується у відповідь на застосований стрес. Кістка людини найслабше пристосована до розтягнення і найсильніше – на стиск. Таким чином, перелом в переважній більшості відбувається через сили розтягування. Стискаючі сили викликають перелом кістки при зсуві. В даній роботі показані різні типи переломів, викликаних різними типами навантажень, а також зміна механічних властивостей кістки відповідно завданому їй ушкодженню.

**Ключові слова:** перелом кістки, механічні властивості кістки, кортикальна кістка, трабекулярна кістка.

Кістка складається з клітинного компонента і позаклітинного матриксу. Клітинний компонент складається з остеобластів, кісткоутворюючих клітин, що руйнують кістку, остеоцитів, що підтримують кістку, які є неактивними остеобластами, затриманими в позаклітинному матриксі. Матрикс, що відповідає за механічну міцність кісткової тканини, утворений органічною та мінеральною фазами. Отже, ми виявили, що кістка є природним композитним матеріалом. За масою кістка містить приблизно 60% мінеральних речовин, 10% води і близько 30% колагенового матриксу. Якість і взаємодія між усіма цими складовими відіграє важливу роль у визначенні механічної поведінки кістки. Колаген і мінеральні кристали зазвичай орієнтовані в поздовжньому напрямку кістки. Таким чином, міцність і жорсткість кістки завжди виявляються вище по поздовжній осі. Мінеральна складова, в більшості, надає кістці жорсткість, тоді як колагенова мережа значною мірою сприяє властивостям її руйнування. Вміст мінералів у кістці незначно змінюється з віком, і ця тенденція також відображається в її жорсткості. Навпаки, енергія, що поглинається під час перелому кістки, значно зменшується зі збільшенням віку. Існують вікові погіршення механічних властивостей кісток.

Поздовжній розріз стегнової кістки людини показаний на рис. 1. Кістка явно неоднорідна. Можна виділити два основних типи кісток: кортикальна кісткова тканина і трабекулярна кісткова тканина. Кортикальна кістка – це більш щільна тканина, яка зазвичай знаходиться на поверхні кісток. Вона організована у вигляді елементів циліндричної форми, які називаються остеонами, що складаються з концентричних ламелей (рис. 2). Трабекулярна кістка досить пориста і організована в трабекули, орієнтована відповідно до напрямку фізіологічного навантаження, як показано на рис. 1. Конфігурація трабекулярних структур дуже різноманітна і залежить від анатомічного місця. Також проявляється ефект старіння. На рисунку 3 показана трабекулярна будова хребців у жінки 36 років та жінки 74 років.

Різні структури кортикальної кістки та трабекулярної кістки призводять до різних механічних властивостей. Механічні властивості кістки сильно варіюються залежно від виду, віку (табл. 1), анатомічної ділянки, вмісту рідини тощо. Вміст мінералів у кістці мало змінюється зі збільшенням віку, і ця тенденція також відображається в її жорсткості. Навпаки, енергія, що поглинається під час перелому кістки, значно зменшується зі збільшенням віку. Мінеральна складова, зазвичай, надає кістці жорсткість, тоді як колагенова мережа значною мірою сприяє властивостям її руйнування. Кортикальна кістка є анізотропним матеріалом, тоб-

то її механічні властивості змінюються залежно від напрямку навантаження. Кортикальна кістка часто вважається ортотропним матеріалом.

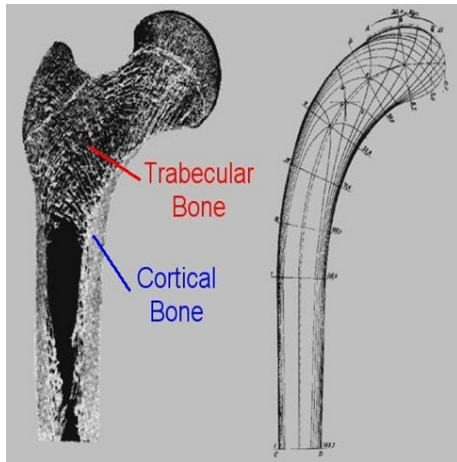


Рис. 1. Поздовжній розріз стегнової кістки людини

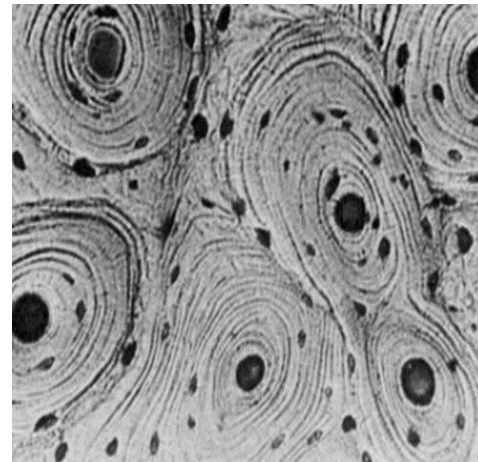


Рис. 2. Пластинчаста структура остеонів

Таблиця 1

Кінцева міцність і кінцеве розтягнення кортикальної кістки стегнової кістки людини

Вік (років)							
	10...20	20...30	30...40	40...50	50...60	60...70	70...80
Гранична міцність на розтяг (МПа)							
Навантаження	114	123	120	112	93	86	86
Тиск	–	167	167	161	155	145	–
Згинання	151	173	173	162	154	139	139
Прокручування	–	57	57	52	52	49	49
Граничне навантаження (%)							
Навантаження	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
Тиск	–	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	–
Згинання	–	2,8	2,8	2,5	2,5	2,7	2,7

Ортотропні матеріали — це клас анізотропних матеріалів, що характеризуються трьома різними модулями Юнга  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  відповідно до напрямку навантаження, трьома модулями зсуву  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$  і шістьма коефіцієнтами Пуассона  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{32}$ . Механічна характеристика трабекулярної кістки ще складніша (рис. 3). Механічні властивості трабекулярної кістки в цілому зумовлені механічними характеристиками окремих трабекул і її високопористою структурою [1].

На кістку під час її роботи діють різні сили. Ці сили навантаження діють в різних напрямках і включають вагу тіла та сили, викликані скороченням м'язів і напруженою зв'язкою. Сила – це вектор. Таким чином, м'язові сили можна розділити на дві складові: одну силу вздовж осі кістки та іншу силу, перпендикулярну до осі кістки. Ця концепція важлива при розробці систем фіксації переломів, оскільки дозволяє спеціалісту підбирати розміри імплантатів так, щоб вони безвідмовно витримували механічні навантаження.

На довгу кістку діють два основні навантаження, які змушують її зміщуватися в лінійному напрямку (трансляція), і ті, які змушують її обертатися, як правило, навколо центру суглоба. М'язи, зазвичай, викликають обертання кістки. Коли сила викликає обертання, у неї є плече моменту. Це перпендикулярна відстань м'язової сили від центру обертання суглоба. Сила стискання призводить до скорочення довжини кістки, розтягнення її подовжує.

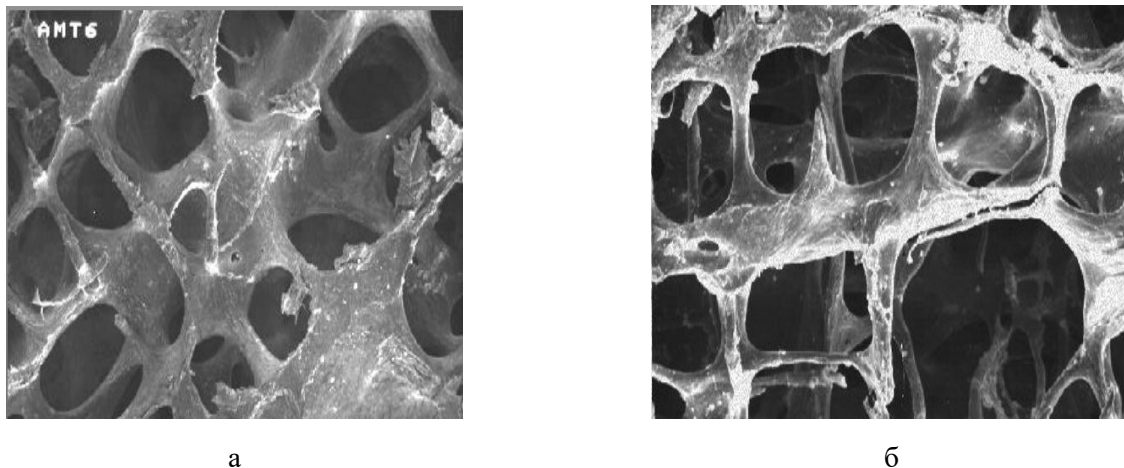


Рис. 3. Трабекулярні структури хребців: *а* – 36-річна жінка; *б* – 74-річна жінка

Стегнова кістка – найбільша кістка нашого тіла. Тому важливо вивчати механіку проксимального відділу стегнової кістки. Перш ніж розробляти будь-який імплантат для лікування переломів, необхідно знати розподіл напруги на проксимальний відділ стегнової кістки. Шийка стегнової кістки відчуває найбільшу напругу, тобто стискаючу напругу, що діє в області п'яткової кістки. Це підтверджується щільною мінералізацією цієї частини стегнової кістки в порівнянні з головою стегнової кістки. Напруга розтягування, що діє на шийку стегна, становить лише половину напруги стиснення. Стовбур стегнової кістки знаходиться під напругою з латеральної сторони і під тиском з медіальної сторони. Напруга стиску дещо перевищує напруження розтягу [2]. Головка стегнової кістки піддається мінімальному напруженню на кручення. Ідеальний імплантат для фіксації переломів шийки стегнової кістки враховує ці сили, а також положення та орієнтацію трабекул. Головка стегнової кістки повинна мати можливість ковзати по осі якомога ближче до осі по якому діє функціональне навантаження. Імплантат слід закріпити безпосередньо під компресійними трабекулами в головці стегнової кістки. Залежно від типу перелому частина імплантату, яка кріпиться до кістки стегнової кістки під переломом, повинна поглинати діючі та розтягуючі напруги без ковзання. Ця функція відома як принцип «натяжної смуги». Зусилля розтягування повинні передаватися на межу кістки/імплантату максимально рівномірно [2].

Кістка найслабша при розтягуванні і найсильніша при стисненні. Тому, коли сила створює розтягуючі напруження в певній ділянці кістки, руйнування спочатку відбудеться в цій області. Це показано на рис. 4, де в довгій кістці, підданій чистому згинанню, створюється поперечний перелом. Верхня опукла поверхня зазнає найбільшого подовження і піддається найбільшим розтягуючим напругам і, отже, тут виникає тріщина. Потім тріщина просувається впоперек через матеріал, і шари трохи нижче зовнішнього шару піддаються високим розтягуючим напругам, поки вони також не розтріскуються. Таким чином, тріщина просувається крізь кістку в поперечному напрямку, поки вона не руйнується. Увігнута поверхня піддається стиску, і тріщина тут не виникає. Другим прикладом є лінія перелому або тріщина, яка виникає, коли кістка піддається перекрученню. У цьому випадку існує спіральний перелом, як показано на рис. 4. У цьому переломі прямокутна область на поверхні кістки спотворюється під час скручування кістки, причому одна діагональ прямокутника подовжується, а інша вкорочується, залежно від напрямку крутити. Утвориться тріщина перпендикулярно діагоналі, яка подовжується, і вона просувається по периметру кістки, що призводить до спірального перелому. Ділянка кістки з найменшим діаметром зазвичай найбільше спотворюється, оскільки допускає найбільшу кількість скручування [3].

Стискаюче навантаження призводить до руйнування кістки в результаті зсуву, про що свідчить ковзання вздовж діагоналі, оскільки кістка слабша на зсув, ніж на стиск. У цьому випадку стиснення призводить до того, що поверхні кістки під кутом 45 градусів до прикла-

деного навантаження ковзають уздовж косої поверхні, як показано на рис. 4. При дуже високих навантаженнях, наприклад під час ударних переломів, також відбувається дроблення кістки, особливо на слабких ділянках. Перелом метелика (рис. 4) є результатом комбінованого згинання та стиснення.

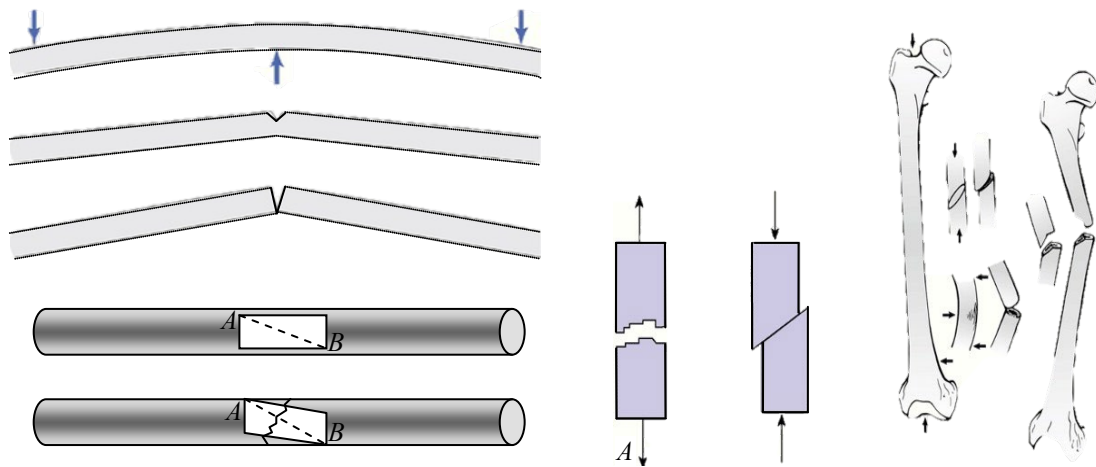


Рис. 4. Різні типи переломів, спричинених різними типами навантажень

Навантаження при згинанні призводить до того, що перелом починає руйнуватися при розтягуванні, утворюючи поперечну тріщину, але коли тріщина прогресує, а кістка, що залишилася, слабшає, вона починає руйнуватися при стисканні, викликаючи косу лінію перелому. Коли кінці падаючої кістки зближуються, третій фрагмент, метелик, може виникнути, коли косий фрагмент відколюється. Виробництво фрагмента метелика, ймовірно, залежить від часу та величини двох основних прикладених навантажень, тобто стиснення та згину [4].

Людська кістка є природним композитним матеріалом, що складається з клітинного компонента та позаклітинного компонента. Він складається з кортикальної кістки і трабекулярної кістки. Міцність людської кістки максимальна при стисненні і мінімальна при розтягуванні, через що кістки руйнуються в основному за рахунок сил розтягування. Стискаючі сили викликають перелом кістки при зсуві. Поєднання напружень згинання та напружень стиснення призводить до перелому кістки-метелика.

Перелом відбувається, коли кістки тканин піддаються розтягу, стиску, або силі зсуву. І міцність кісткової тканини, і характер сил, що діють на кістку, змінюються від дитинства до старості, як у нормі, так і в результаті захворювання. Тому частота і тип переломів змінюються з віком. Кісткова тканина у молодих людей має високу стійкість до механічних деформацій. Переломи кортикальної кістки у дорослих вимагають величезних зусиль, наприклад, при автомобільних аваріях, і тому часто пов'язані з серйозними травмами шкіри та іншими ураженнями м'яких тканин. Кістки у дітей пружні та еластичні, а оболонка, що оточує окістя – товста. Тому кутова деформація довгих кісток у дітей часто призводить до неповних або «зелених» переломів. У людей похилого віку кісткова тканина стає більш крихкою, особливо губчаста кістка в хребцях і в плечових, зап'ястних, тазостегнових і колінних суглобах.

Багато захворювань знижують міцність кісткової тканини, а деякі піддають організм підвищеним механічним зусиллям. Остеопороз, який поширений у жінок у постменопаузі, є основною причиною переломів у літньому віці. Менш поширеними причинами зниження міцності кісток є недосконалий остеогенез, тривале лікування кортикостероїдами та остеомалія. Поширеними причинами локального зниження міцності кісток є ураження периферичних нервів і пухлини [5].

Існування перелому часто впливає з історії травми та спостереження за набряком, чутливістю, неправильним розташуванням, звуком, який видають зламані кінці, втратою функції та пов'язаними травмами. Точний діагноз встановлюється за допомогою рентгенологічного дослідження. Більшість переломів відбуваються без пошкодження шкіри (закриті пе-

реломи). Шкірна рана при відкритих переломах спричинена або сильною прямою травмою, або гострим уламком кістки, який проколює шкіру зсередини.

Перелом іноді розвивається повільно, а не раптово. Переломи виникають через те, що кісткова тканина піддається впливу сил, які переважають її здатність до структурної адаптації. Приклади включають перелом стегнової кістки та перелом кісток стопи (маршовий перелом), у солдатів протягом перших місяців фізичної підготовки. Стресові переломи зазвичай викликають біль ще до того, як аномалію кісток можна побачити на рентгенівському знімку. Переломи, які виникають внаслідок попереднього захворювання, називаються патологічними переломами, виникають вони в наслідок захворювання кісток, пов'язаних з остеомаліцією, хворобою Педжета та променевим ураженням кісток.

**Висновок.** Перелом являє собою досить розповсюджений тип травми у живій природі. Дослідження та вивчення факторів, які впливають на кісткову тканину та суміжні біологічні системи, зробили великий внесок у профілактику та лікування наявних, та подальших, травматичних симптомів, які впливають на якість життя. Важливо розуміти біологічну та фізичну природу досліджуваних деформацій задля швидкого та професіонального надання кваліфікованої медичної допомоги. Обізнаність спеціалістів розширює можливості розроблення медичних інструментів, протезів та імплантів. Що позитивно впливає на тривалість реабілітаційного етапу.

### Література

1. Кость [Електронний ресурс] // Википедія. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C>.
2. Посттравматические состояния верхних и нижних конечностей [Електронний ресурс] // Copyright. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [https://banjakoviljaca.rs/ruski/post\\_frakture\\_ru.php](https://banjakoviljaca.rs/ruski/post_frakture_ru.php).
3. Хвостова С.А. Механические свойства костей скелета [Електронний ресурс] / С.А. Хвостова // Российская академия естествознания. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://monographies.ru/en/book/section?id=7835>.
4. Панфилов, Г.П., Гилев, М.В., Измоденова, М.Ю., & Зайцев, Д.В. (2019). Упругопластические свойства трабекулярной костной ткани. Вектор науки Тольяттинского государственного университета, (4 (50)), 45–51. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-4-45-51>
5. Основы взаимодействия биологических тканей с искусственными материалами [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.ispms.ru/files/Publications/sharkeev\\_2013/pdf/1\\_2.pdf](http://www.ispms.ru/files/Publications/sharkeev_2013/pdf/1_2.pdf)