

УДК 621: 620. 1. 05 (031)

В. О. Маланчук, А. В. Копчак, М. С. Шидловський

ЗМІНА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ УЛАМКІВ НИЖНЬОЇ ЩЕЛЕПИ ПРИ ТРАВМАТИЧНОМУ ПЕРЕЛОМІ

Національний медичний університет ім. О. О. Богомольця

Хірургічне лікування травматичних переломів нижньої щелепи – актуальна проблема хірургічної стоматології та щелепно-лицевої хірургії. Методики проведення остеосинтезу постійно вдосконалюються, при цьому найбільш перспективними вважають операції, що відповідають концепції функціонально-стабільного остеосинтезу. Ця концепція передбачає досягнення анатомічно точної репозиції кісткових фрагментів, їх стабільну фіксацію, мінімальну інвазивність втручання та раннє функціональне навантаження на уражену кістку. За дотримання цих принципів, на думку авторів, створюються оптимальні умови для зрощення переломів у якомога коротший термін і відпадає необхідність у тривалій імобілізації ураженої щелепи [1, 2].

Найбільш проблематичним при цьому виявилось досягнення фіксації, здатної утримати кісткові фрагменти в правильному положенні за будь-яких умов жуваального навантаження. Для цього було запропоновано як системи, здатні сприймати великі навантаження без незворотних деформацій і руйнування (компресійні та реконструктивні пластини з бікортикальною фіксацією), так і системи, здатні перерозподіляти навантаження за рахунок своєї форми і розташування (монокортикальні мініпластини за Champy та Lodde) [2]. Їхню здатність протидіяти жувальному навантаженню було вивчено і підтверджено із застосуванням традиційних методів біомеханіки (натурні експерименти, методи фотопружності, математичне моделювання тощо) [3]. Однак досвід клінічного застосування

відомих систем для фіксації кісткових уламків свідчить, що частота вторинного зміщення уламків та порушень консолидації після проведення остеосинтезу сягає 10-12% [1, 2]. Накісні пластини не завжди здатні утримати уламки в правильному положенні в 3-х площинах. Особливо проблематичними з цієї точки виявляються застарілі та уламкові переломи, а також переломи з дефектом кістки.

Надійність фіксації кісткових уламків при переломі визначається, з одного боку, технічними характеристиками і розташуванням фіксуючого пристрою, а з іншого – властивостями кісткової тканини уламків, з якою він має утворити єдиний комплекс із високими жорсткістю і міцністю [3, 2]. Саме властивості кісткової тканини нерідко стають вирішальним чинником, що визначає прогноз хірургічного втручання.

Численні патоморфологічні дослідження свідчать, що кісткова тканина уламків у посттравматичний період зазнає значних змін. При травмі в кістковій тканині, наближеній до перелому, розвиваються ішемія, дистрофія й остеонекроз із подальшою резорбцією і перебудовою кінців уламків. Цей процес здатний охоплювати значні ділянки ураженої щелепи і проходить певні фази, кожна з яких характеризується різною інтенсивністю і співвідношенням процесів резорбції та новоутворення кісткової тканини. Мінеральна насиченість кісткової тканини уламків при цьому може суттєво змінюватись [4, 5, 6].

Зазначені процеси, що призводять до глибоких структурних змін ураженої кістки, ймовірно здатні

впливати на її механічні властивості та бути однією з причин, що зумовлюють неспроможність елементів фіксації утримати уламки в правильному положенні. При фіксації перелому накісною пластиною в реальних умовах шурупів часто розміщують в ушкодженій кістковій тканині, яка перебуває в процесі інтенсивної перебудови. Отже, жорсткість системи кістка-фіксуючий пристрій буде змінюватися залежно від особливостей перебігу біологічно-детермінованих процесів у кістковій тканині уламків. Утім, у абсолютній більшості біомеханічних досліджень (як експериментальних, так і математичних) посттравматичні зміни кісткової тканини уламків не враховують, що може призводити до невідповідності розрахункових даних отриманих у натурних і модельних експериментах, та клінічного досвіду [3, 7, 8].

Слід зазначити, що, незважаючи на те, що структурні зміни в кісткових уламках при переломі досить добре вивчені, характер змін їхніх механічних властивостей залишається недослідженим, тому оцінка взаємозв'язків між особливостями перебігу біологічних процесів і механічними властивостями є переважно гіпотетичною.

Метою дослідження було вивчити зміни механічних властивостей кісткової тканини уламків при переломах нижньої щелепи та встановити їхній взаємозв'язок із характером і давністю травми.

Матеріали і методи дослідження.

Матеріалом дослідження було 50 зразків кортикальної і губчастої кістки, отриманих при проведенні оперативних втручань на нижній

щелепі. Вік хворих становив від 15 до 60 років (у середньому 30,5 років). Чоловіки серед загальної кількості склали 70%. 20 зразків було отримано з неушкоджених щелеп при проведенні кістково-пластичних операцій, дентальній імплантації, заборі кісткових трансплантатів, видаленні ретенуваних зубів тощо. Інші 30 зразків становили собою фрагменти кісткових уламків, видалені в пацієнтів із травматичними переломами нижньої щелепи. Строки після травми становили від 6 діб до 3 місяців. Уламкові переломи були наявні в 50% хворих. Розподіл зразків кісткової тканини за локалізацією був таким: ментальний відділ – 12%, тіло нижньої щелепи – 28%, кут і гілка нижньої щелепи – 60%. Розміри і форма отриманих фрагментів кістки визначалися технічними особливостями проведення оперативного втручання і варіювали значною мірою. Довжина зразків коливалась від 2,85 до 10 мм. Після антисептичної обробки отримані фрагменти зволожували в ізотонічному розчині хлориду натрію і заморозували при температурі від -4 до -7°C у закритих пластикових контейнерах [8]. Перед проведенням дослідження фрагменти піддавали механічній обробці, надаючи їм правильної геометричної форми у вигляді прямокутного паралелепіпеда або циліндра. Останні формували за допомогою сталевого кісткового трепана з внутрішнім діаметром 3 мм. Для досягнення паралельності торців циліндра або граней паралелепіпеда проводили 3-4 послідовні операції шліфування на спеціально розробленому шліфувальному пристрої з постійним охолодженням фізіологічним розчином. Кожен виготовлений зразок фотографували, зважували на аналітичних вагах, вимірювали його лінійні розміри штангенциркулем із цифровою індикацією та обчислювали густину кісткової тканини.

Для визначення механічних властивостей зразка проводили його компресійне навантаження в універсальній випробувальній ма-

шині TIRATEST-2151. Швидкість деформування приймали рівною 0,5 мм/хв. Для вивчення ступеня механічної анізотропії кісткової тканини навантаження зразків прямокутної форми проводили в 3-х взаємно перпендикулярних площинах із зусиллям, що не виходило за межі пружного діапазону та подальшим вимірюванням залишкових деформацій. Циліндричні зразки навантажували лише вздовж їхньої вертикальної осі.

По закінченні дослідження отриману інформацію фіксували у вигляді діаграми деформування в координатах зусилля-деформація. Модуль Юнга кісткової тканини обчислювали як тангенс нахилу лінійної ділянки діаграми деформування в координатах напруження – відносна деформація зразка кістки. Для вивчення граничних напружень (межа міцності, межа пропорційності) додатково проводили досліди з навантаженням до повного руйнування зразка. Ми вважали, що гранично допустимим значенням напруження для кісткової тканини при її взаємодії з фіксуючими пристроями є межа пропорційності, оскільки при перевищенні цієї величини в кістковій тканині виникають незворотні деформації, нерідко зумовлені руйнуванням окремих кісткових структур на мікрорівні. В умовах *in vivo* це буде призводити до активації процесів резорбції та перебудови кістки.

Для вивчення статистичних зв'язків між окремими фізико-механічними характеристиками кісткової тканини було застосовано коефіцієнт кореляції Пірсона. До статистичного аналізу залучали всю сукупність отриманих даних.

Результати. За результатами досліджень було встановлено, що неушкоджена кортикальна кістка мала густину від 1,68 до 2,16 г/см³. За своїми механічними властивостями вона характеризувалася вираженою механічною анізотропією (ортотропією) та неоднорідністю, зі значними індивідуальними і топографічними варіаціями. Максимальна жорсткість була ви-

значена в напрямку, що відповідав орієнтації більшості остеонів. Значення модуля Юнга E1 у цьому напрямку в різних зразках становило від 6500 до 15500 МПа (в середньому 10298 МПа). У площинах, перпендикулярних напрямку максимальної жорсткості, значення модуля Юнга зменшувалось: співвідношення E1: E2 в середньому становило 1,65, а E2: E3 – 1,17. Розбіжності в середньому значенні модуля пружності для різних анатомічних зон нижньої щелепи виявили, що в ділянці підборіддя та тіла жорсткість кортикального шару була дещо нижчою, ніж у ділянці кута і гілки щелепи (в середньому на 7%), однак за такої кількості спостережень ці розбіжності виявилися статистично невірогідними. Межа пропорційності кортикальної кістки майже в усіх спостереженнях перевищувала 100 МПа, що в цілому відповідає даним, отриманим у інших дослідженнях [7, 9].

Губчаста кісткова тканина характеризувалася меншою густиною, більшою анізотропією і, на відміну від кортикального шару, сильно вираженою просторовою неоднорідністю. Густина губчастого шару становила 0,91-1,3 г/см³ (у середньому 1,1 г/см³). Значення модуля пружності губчастої кістки коливалось у межах 116-1290 МПа (в середньому становило 564 МПа). Співвідношення E1: E2 і E2: E3 становило в середньому 1,73 і 1,97 відповідно. Максимальна неоднорідність губчастого шару була визначена в ділянці тіла нижньої щелепи в напрямку від кортикальної пластинки до нижньощелепного каналу. В центральних, наближених до каналу ділянках, жорсткість у окремих випадках була майже в 7 разів меншою, ніж у біякортикальних шарах. Натомість у ділянці гілки губчаста кістка була однорідною за структурою і механічними властивостями. Під дією навантаження в губчастій кістці швидко розвивалися пластичні деформації, пов'язані головним чином із руйнуванням приповерхневих структур. Межа пропорційності коливалась

Таблиця 1

Зміна фізико-механічних характеристик кісткової тканини нижньої щелепи при переломі

	Неушкоджена ККТ	Неушкоджена ГКТ	ККТ уламків при переломі	ГКТ уламків при переломі
Модуль Юнга (МПа)	10298+1000	564+121	4599+574	193+57
Межа пропорційності (МПа)	126+12	13,8+6	55,9+6,9	5,93+1,3
Густина (г/см ³)	1,91+0,04	1,11+0,06	1,79+0,06	0,95+0,03

Примітки:

ККТ – кортикальна кісткова тканина;

ГКТ – губчаста кісткова тканина.

у межах від 3 до 30 МПа (на ділянках ущільнення губчастої кістки) і в середньому становила 13,8 МПа.

При переломі кісткова тканина уламків зазнавала структурної дезорганізації, пов'язаної з механічною травмою та інтенсивною резорбцією в посттравматичний період. Це відображалось у зменшенні її густини, жорсткості, межі міцності та пропорційності (табл. 1). Зменшення густини кісткової тканини, зумовлене головним чином втратою мінерального компонента, було виражено різною мірою, але в середньому не перевищувало 7%. Натомість середнє значення модуля пружності кортикальної кістки (E1) зменшувалось у 2,4 разу в порівнянні з контрольною групою. Межа пропорційності в усіх спостереженнях була менше 100 МПа і в середньому становила 55 МПа. Зменшення жорсткості та міцності ушкодженої кістки було більш виразне в кісткових уламках, що втратили зв'язок з окістям, та в пізні строки після травми. Так, середнє значення модуля Юнга кортикальної кістки в строк від 15 днів до 3 місяців було на 28% нижчим, ніж у більш ранні строки. Вірогідних відмінностей у ступені механічної анізотропії кортикальної кістки не було виявлено.

У губчастій кістковій тканині зміни були ще виразніші: середнє значення модуля Юнга зменшувалось у 2,9 разу, а межа міцності та пропорційності – майже у 2,5 рази. Аналіз механічних властивостей

губчастої кістки в суглобових голівках, видалених при проведенні оперативних втручань із приводу застарілих переломів виросткового відростка із вивихом, підтвердив, що процес перебудови в разі порушення кровопостачання охоплює значні масиви губчастої кістки, причому зміни механічних властивостей із часом стають виразнішими.

Статистичний аналіз підтвердив, що між окремими фізико-механічними характеристиками кісткової тканини є вірогідні статистичні зв'язки. Так, сильні зв'язки були виявлені між її густиною і жорсткістю ($r=0,71$, $p<0,05$), густиною і міцністю ($r=0,84$, $p<0,05$), жорсткістю і міцністю ($r=0,84$, $p<0,05$).

Обговорення. У нашому дослідженні за допомогою аналізу біопсійного матеріалу, отриманого у хворих із травматичними переломами нижньої щелепи, було встановлено, що механічні властивості кісткової тканини уламків нижньої щелепи зазнають значних змін, що полягають головним чином у зменшенні її жорсткості та міцності. Ці зміни більше виражені в губчастій кістковій тканині і з часом поглиблюються.

Відомо, що механічні властивості кістки, її здатність сприймати і перерозподіляти навантаження визначаються міжклітинним кістковим матриксом [7,10]. Зміна механічних властивостей кісткової тканини уламків при переломі зу-

мовлена його структурною дезорганізацією та втратою мінерального компонента.

Первинні зміни, які виникають у кістковій тканині, пов'язані із безпосередньою дією травмуючого агента і певною мірою – з ушкодженням кінців уламків, що пов'язане з їх рухомістю в період, який передував тимчасовій або постійній іммобілізації [1,4]. Структурні зміни полягають в утворенні щілин, тріщин, порожнистих дефектів у товщі кістки, переломах і зминанні окремих остеонів і трабекул, розшаруванні та взаємному зміщенні кісткових пластинок (ламель) тощо.

Згодом кісткова тканина уламків зазнає інтенсивної резорбції та перебудови. Цей процес визначається ступенем ішемічних і некротичних змін кісткової тканини уламків і тісно пов'язаний із ревазуляризацією ушкоджених зон та перебігом репаративної регенерації в ділянці перелому [5,6]. Процес резорбції кісткової тканини на позаткових стадіях випереджає її утворення і дозрівання [5,10], що призводить до зменшення мінеральної насиченості кісткової тканини уламків і як наслідок – зменшення їхньої густини, що і було встановлено в нашому дослідженні.

Однак значне зменшення жорсткості та міцності кісткової тканини виникало навіть за невеликого зменшення її густини. Зміни механічних властивостей кістки зумовлені не лише абсолютним зниженням умісту кальцію в кісткових уламках, а й топографічними характеристиками процесів перебудови. Резорбція, що виникає в ушкодженої кістковій тканині, призводить до руйнування структури кісткового матриксу на певних ділянках, за рахунок чого кістка втрачає здатність сприймати навантаження як цілісна інтегрована система.

У більш пізні строки після травми вплив біологічних процесів на механічні властивості кістки визначальним. Зменшення жорсткості та міцності кістки, пов'язане з її перебудовою, може бути

разнішим і охоплювати більші зони, ніж ті, що зазнали механічного ушкодження на мікрорівні під безпосередньою дією травмуючого агента.

Отже, жорсткість і міцність кісткової тканини залежать від таких чинників: 1) первинного структурно-функціонального стану кісткової тканини пацієнта; 2) ступеня травматичного ушкодження кісткової тканини уламків при переломі та в ранній посттравматичний період до застосування іммобілізації; 3) перебігу процесів репаративної регенерації, ревазуляризації і перебудови кісткової тканини; 4) інших локальних і системних чинників (приєднання інфекції, особливості проведення оперативного втручання тощо). Зміни механічних властивостей кісткової тканини уламків при переломі значно перевищують діа-

пазон індивідуальних і топографічних варіацій. Ігнорування цього факту при проведенні біомеханічних досліджень і плануванні оперативних втручань може призводити до незадовільних клінічних

результатів, особливо у випадках поєднання несприятливих системних (структурно-функціональний стан кісткової тканини) і локальних (тяжкість травми) чинників.

Висновки

1. Механічні властивості кісткової тканини уламків нижньої щелепи при травматичному переломі вірогідно відрізняються від показників неушкодженої кісткової тканини.

2. Зміни фізико-механічних властивостей кортикальної та губчастої кістки при травматичних ушкодженнях полягають у зменшенні її густини в середньому на 7 і 14% відповідно, жорсткості в 2,4 та 2,9 рази, межі міцності та пропорційності в 2,3-2,5 рази.

3. Зазначені зміни пов'язані як із безпосереднім механічним ушкодженням кісткових структур, так і з процесами посттравматичної резорбції та перебудови кістки. Вони виразніші при застарілих переломах щелепи (в строк більше 15 діб) і у вільних уламках, що втратили зв'язок з окістям.

Література

1. Швырков М. Б. Неогнестрельные переломы челюстей / М. Б. Швырков, В. В. Афанасьев, В. С. Стародубцев. – М.: Медицина, 1999. – 336 с.
2. Maxillo-facial trauma and esthetic facial reconstruction / edited by P. W. Booth, B. L. Eppley, R. Schmelzeisen. – Churchill Livingstone, 2003. – 662 p.
3. Матрос-Таранец И. Н. Биомеханические исследования в экспериментальной стоматологии / И. Н. Матрос-Таранец. – Донецк, 1998. – 122 с.
4. Григоровский В. В. Посттравматические поражения костей: патоморфология и патогенез: дис. доктора мед. наук: 14. 03. 02 / В. В. Григоровский. – К., 2001. – 312 с.
5. Корж А. А. Репаративная регенерация кости / А. А. Корж, А. М. Белоус, Е. Я. Панков. – М.: Медицина, 1972. – 232 с.
6. Оноприенко Г. А. Васкуляризация костей при переломах и дефектах / Г. А. Оноприенко. – М.: Медицина, 1995. – 224 с.

7. Зацюрский В. М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В. М. Зацюрский, А. С. Арунин, В. Н. Селуянов. – М., 1981. – 143 с.

8. Schwartz-Dabney C. L. Variations in cortical material properties throughout the human dentate mandible / C. L. Schwartz-Dabney, P. C. Dechow // American journal of physical anthropology. – 2003. – Vol. 120. – P. 252 – 277.

9. Arendts F. J. Mechanical characteristics of the human mandible and study of in vivo behavior of compact bone tissue, a contribution to the description of biomechanics of the mandible-II / Arendts F. J., Sigolotto C. // Biomed. Tech. – 1990. – Vol. 35 (6). – P. 123-130.

10. Поворознюк В. В. Костная система и заболевания пародонта / В. В. Поворознюк, И. П. Мазур. – К., 2003. – 446 с.

Стаття надійшла
16. 10. 2009 р.

Резюме

Проведено изучение механических свойств костной ткани нижней челюсти в норме и при ее травматических повреждениях путем компрессионной нагрузки образцов губчатой и кортикальной кости, полученных при проведении оперативных вмешательств. При механическом анализе определяли плотность, модуль Юнга, предел прочности и пропорци-

ональности, а также степень анизотропии основных механических констант костной ткани и изучали корреляционные связи между этими показателями. Установлено, что механические свойства костной ткани отломков нижней челюсти при травматическом переломе достоверно отличались от показателей неповрежденной кости. Изменения физико-механических свойств кортикальной и губчатой кости проявлялись в существенном

снижении ее плотности, жесткости, предела прочности и пропорциональности. Эти изменения были связаны как с непосредственным механическим повреждением костных структур, так и с процессами посттравматической резорбции и перестройки кости.

Ключевые слова: биомеханика, нижняя челюсть, травматические переломы, костная ткань, механические свойства.

Summary

The study of the mechanical properties of the mandible bone tissue has been performed. The compression test has been used to analyze the specimens of intact or injured cortical and spongius bone, obtained during surgical interventions. The bone density, Young's modulus

and ultimate stress have been estimated with the help of mechanical analysis as well as the level of the mechanical anisotropy and correlations between the mechanical indexes. It has been found out, that mechanical properties of the bone tissue in fragments of an injured mandible were significantly different from the intact bone. The changes of mechanical properties of the cortical and spongius bone included the significant decrease in its density, stiffness and strength. These changes have been associated with the direct mechanical injury of the bone structures as well as with the posttraumatic bone resorbition and remodeling.

Key words: biomechanics, mandible, traumatic fractures, bone tissue, mechanical properties.