

В.П. Попов, О.К. Кадурін

Температурне розширення компактної кісткової тканини

Изучали dilatометрические свойства компактной костной ткани человека. Выявлена сложная зависимость изменения размеров костного образца при его постепенном нагревании. Получены закономерности относительных размеров и коэффициенты температурного расширения при нагревании костной ткани на воздухе и в воде, а также dilatометрия при дегидратации костной ткани.

ВСТУП

Біологічні тканини *in vivo* постійно перебувають, що пов'язано зі змінами їх розмірів при фізіологічному навантаженні. Кісткова тканина в панцирі гідроксилapatиту обмежена в зміні розмірів, але вони є [1]. Особливий інтерес викликають зміни в розмірах компактної кісткової тканин (ККТ) при температурних коливаннях [2].

Мета нашої роботи – вивчити dilatометричні властивості ККТ при нагріванні на повітрі і в воді, а також при її дегідратації в кімнатних умовах.

МЕТОДИКА

Для визначення відносних змін розмірів зразків ККТ під дією температурного навантаження попередньо було використано ККТ дорослих людей після смерті, які не мали патології кісткової системи, а також трубчасті кістки великої рогатої худоби. В експериментах вивчали зміни розмірів зразків ККТ дорослого чоловіка 44 років. Використовували зразки кісткової тканини, що були виготовлені з середньої третини стегнової кістки з повздовжньою орієнтацією. При зберіганні зразків кістки в кімнатних умовах і особливо, під час механічної обробки відбувається теплова дегідратація [3, 4].

Щоб компенсувати часткову дегідратацію, кісткову тканину попередньо регідратували зануренням у дистильовану воду до максимального насичення, коли надалі маса зразка вже не збільшувалася [5].

На зміни розмірів і об'єму кісткової тканини впливають і фізіологічні фактори [1], тому так необхідно знати її dilatометричні властивості. Вивчення зміни розмірів, або dilatометричні дослідження компактної кісткової тканини людини, проводили на модифікованому dilatометрі з використанням вимірювача довжини типу ИЗВ-2 з максимальною чутливістю до зміни довжини $\approx 10^{-7}$ м. Вимірювання довжини дослідного зразка проводили за різницею показань приладу, коли вимірювальний контактор постійно спирається на базову поверхню вимірювального столу оптиметра.

Для прямих dilatометричних вимірювань ми використовували β – відносне подовження ККТ як функцію температур $\beta = f(t^\circ)$, де t° – температура.

$$\beta = \Delta l / l_0, \quad (1)$$

де Δl – зміна розміру зразка, l_0 – довжина зразка при кімнатній температурі.

Зразок вставляли в dilatометричну комірку. Дослідні зразки ККТ у вигляді паралелепіпеда нагрівали в спеціальній печі. Таким чином реалізується квазіабсолютна

методика розрахунку $\Delta l/l_0$ ККТ і відповідно коефіцієнта теплового розширення (КТР). Помилка величини КТР за рахунок розширення вимірювального контактора не перевищує 3 %. Для перевірки точності вимірювань використовувався контрольний кварцевий зразок КУ-1 державного Російського еталону другого розряду №7 (НВО ВНДІМ ім. Менделєєва, Санкт-Петербург).

Температуру зразків оцінювали за допомогою Си-константанової термопари з точністю $\pm 0,1$ К та фіксували за електрорушійною силою цифровим мілівольтметром В7-34А через 1–2 с, що давало можливість забезпечити одержання надійної інформації через 2–4 К у режимі квазітермодинамічної рівноваги.

Відповідно до цього було апробовано й використано на практиці такий зручний прийом одержання дилатограм $\beta=f(t^\circ)$: нагрівання зразка ККТ припиняли після його нагріву від кімнатної температури до температури початку структурних змін, після чого вивчали дилатацію зразка за інерцією. Якщо при наступному охолодженні зразка його розміри зменшувалися, це підтверджувало відсутність гістерезису в температурній залежності, і структурні зміни в ККТ ще не відбуваються. При наявності ознак гістерезису в ділянці більш високих температур можна стверджувати про наявність структурних змін у ККТ [2]. Доцільно зауважити, що гістерезисні явища можуть спостерігатися при нерівномірному нагріванні зразка ККТ, а також контактора

і вимірювальної бази оптиметра.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 представлено дилатограму $\beta=f(t^\circ)$ ККТ. У межах температур 20–40°C нахил кривої є додатним, а при подальшому нагріванні зразка спостерігається плато, далі зменшення довжини зразка, і як наслідок, β має від'ємний знак, що вірогідно пов'язано з поступовим виходом кристалізаційної води зі зразка.

Таким чином, охолодження після нагрівання зразка ККТ виявило незворотні зміни його геометричних розмірів, величина яких була в межах 0,05 мм, що становить 0,1 % від довжини зразка.

Обчислимо математичну закономірність величини β від температури. Представимо криву, як кілька лінійних відрізків, що зображено на рис. 1. Величина β від 20 до 93°C має таку закономірність.

$$\beta = \begin{cases} 0,2 \cdot 10^{-4}(t^\circ - 20^\circ\text{C}), & \text{коли } 20^\circ\text{C} \leq t^\circ \leq 37^\circ\text{C} \\ 3,1 \cdot 10^{-4}, & \text{коли } 37^\circ\text{C} \leq t^\circ \leq 73^\circ\text{C} \\ 3,1 \cdot 10^{-4} - 0,16 \cdot 10^{-4}(t^\circ - 73^\circ\text{C}), & \text{коли } 73^\circ\text{C} \leq t^\circ \leq 92^\circ\text{C} \\ -0,8 \cdot 10^{-4}(t^\circ - 92^\circ\text{C}), & \text{коли } 92^\circ\text{C} \leq t^\circ \leq 100^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

Дилатометричні властивості матеріалів характеризуються КТР:

$$\alpha = \beta / \Delta t^\circ, \quad (3)$$

де Δt° – інтервал між кімнатною й досліджуваними температурами.

У наступному експерименті було досліджено зміни КТР для ККТ в інтервалі температур від 0 до 57°C. На рис. 2 представлено залежність КТР кісткової тканини

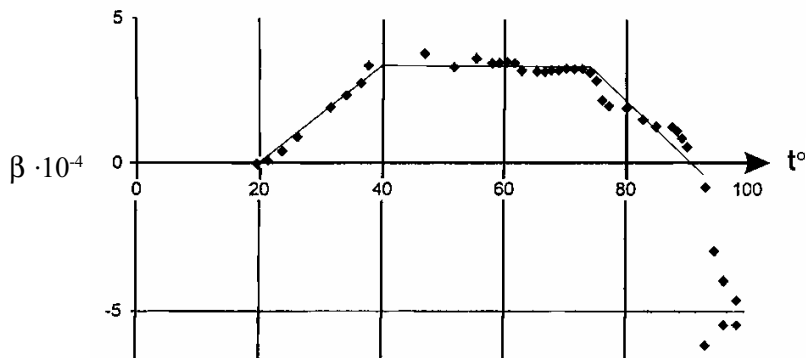


Рис. 1. Температурна залежність відносних розмірів кісткового зразка при повздовжній орієнтації. Довжина зразка 19,3 мм

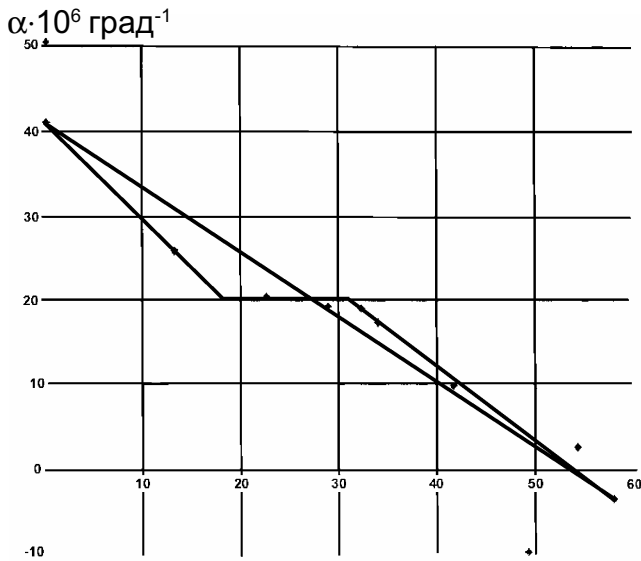


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта температурного розширення компактної кісткової тканини при повздожній орієнтації. Довжина зразка 15 мм

від температури. Тільки в інтервалі температур 17–32°C КТР був стабільним і дорівнював $20 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. При 37°C він дорівнює приблизно $16 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, а при 54°C – 0 град⁻¹. При подальшому нагріванні зразка КТР стає від’ємним. Охолодження зразка на 9°C з 58 до 49°C підвищує негативне значення КТР, що свідчить про незворотні процеси в структурі кісткової тканини.

Знайдемо математичну закономірність зміни КТР від температури в інтервалі від 0 до 60°C. Цю закономірність можна представити прямою лінією, як це показано на рис. 2, і тоді записати:

$$\alpha = (41 - 0,8 \cdot t^{\circ}) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 0^{\circ}\text{C} \leq t^{\circ} \leq 57^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Якщо представити цю закономірність як три прямі лінії, то можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (41 - 1,17 \cdot t^{\circ}) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 0^{\circ}\text{C} \leq t^{\circ} \leq 17^{\circ}\text{C} \\ \alpha &= 20 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 17^{\circ}\text{C} \leq t^{\circ} \leq 32^{\circ}\text{C} \\ \alpha &= (52 - t^{\circ}) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 32^{\circ}\text{C} \leq t^{\circ} \leq 57^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right\} (5)$$

Таким чином, ми одержали закономірності відносного подовження і КТР для ККТ залежно від температури.

Відомо, що в кімнатних умовах ККТ частково дегідратується [2]. Можна припустити, що її розміри будуть зменшуватися. Було проведено експеримент. По-

передньо свіжу ККТ насичували впродовж 1–2 год дистильованою водою. Після цього спостерігали за зменшенням розмірів зразків при дегідратації в кімнатних умовах. На рис. 3 представлено зміни розмірів зразка відносно насиченого стану. Найбільші зміни в розмірах для тангенціальної орієнтації і найменші для повздожньої, коли у останньої орієнтації зміни були в 7–10 разів менші.

На рис. 4 показано зміни об’єму попередніх трьох зразків відносно насиченого стану при дегідратації на повітрі. Було підраховано зменшення об’єму ККТ при дегідратації в кімнатних умовах. При цьому за попередніми даними [2] величина віднятої вологи у ККТ в аналогічних умовах становила близько 2 %, а дилатометричні дослідження показали, що впродовж однієї доби об’єм ККТ зменшився майже на

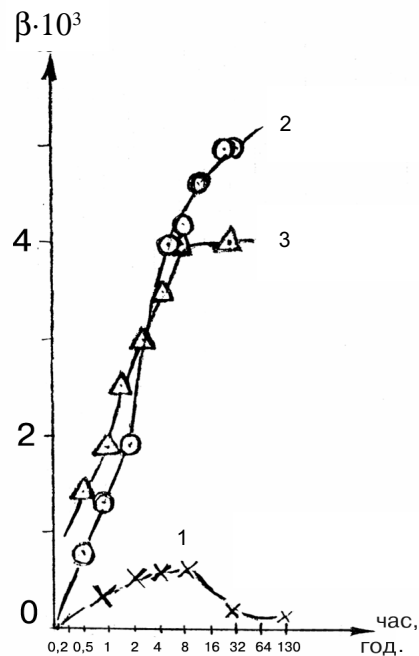


Рис. 3. Зміни відносних розмірів зразків компактної кісткової тканини у разі її дегідратації при 18°C на повітрі. Довжина зразків: повздожня орієнтація (1) – 18,0 мм; тангенціальна (2) – 14,4 мм; радіальна (3) – 10,8 мм

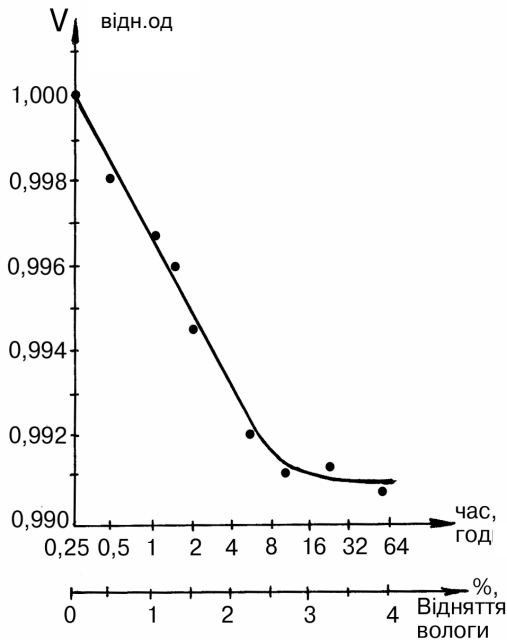


Рис. 4. Зменшення об'єму (V) та вологості свіжої компактної кісткової тканини у разі її знаходженні в кімнатних умовах при 18°C. Розміри зразків див. рис. 3

0,9 % (див. рис. 4).

При знаходженні зразка ККТ у кімнатних умовах спостерігаються процеси дегідратації, які звичайно впливають на внутрішній стан ККТ. Завдяки нагріванню з одного боку повинно проходити розширення зразка, але одночасно іде і процес дегідратації, який призводить до його скорочення. Як показали експерименти, процес зменшення розмірів зразка превалує.

Для зняття дії дегідратації при нагріванні було проведено додатковий експеримент з нагрівання зразка ККТ у воді, коли вологість не змінюється. Беручи до уваги, що в ККТ є кістковий жир з температурою топлення 41°C, і для того щоб не змінювати її внутрішній склад нагрівання у воді проводили до температури не більше ніж 40°C. На рис. 5 показано зміни відносного подовження при тепловому навантаженні ККТ у воді. При першому навантаженні з підвищенням температури росте β і сягає $16 \cdot 10^{-5}$ при 39°C. При охолодженні йшов процес зменшення β , але відмічалася

наявність петлі гістерезису, і після досягнення кімнатної температури вона залишалась. Експеримент тривав до 15 год. Коли через 12 год експеримент повторили, то було виявлено лише невелику петлю. Експеримент тривав також 15 год. Коли через 12 год було втретє проведено теплове навантаження ККТ у воді, то була виявлена невелика петля гістерезису, яка закінчувалася полочкою, і далі діаграма йшла вверх майже до $20 \cdot 10^{-5}$ при 39°C (див. рис. 5).

Спільним для трьох експериментів був подібний нахил кривих теплового навантаження ККТ; особливо чітко він проявився на кривих охолодження. Цей нахил становив $0,5 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹.

Окремо слід зупинитися на кривих теплового навантаження ККТ під час нагрівання. Тут при $\beta = (12-13) \cdot 10^{-5}$ виявилася полочка при нижній температурі 22°C для першого і третього навантажень, а верхній – для першого навантаження – 27°C і третього – 24°C. При другому навантаженні полочка була значно нижче від попередніх; при $\beta = 1,5 \cdot 10^{-5}$ і температурному

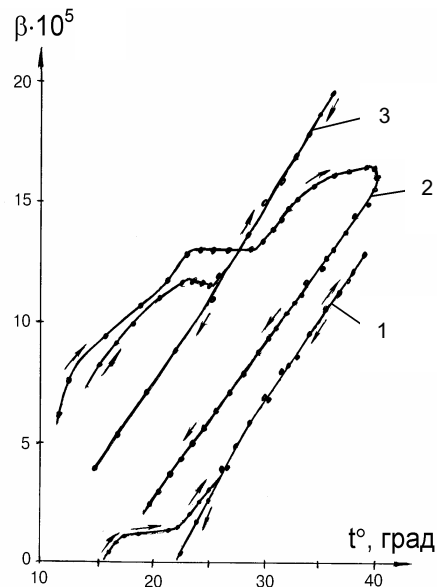


Рис. 5. Зміна відносних розмірів зразка в повздовжній орієнтації його при трьох послідовних теплових навантаженнях. Довжина зразка 19,2 мм

інтервалі 17–23°C.

Отже, на відносну зміну розмірів зразків ККТ впливає в першу чергу температура та вологість. Ці закономірності мають складний характер.

ВИСНОВКИ

1. При нагріванні ККТ на повітрі в інтервалі температур 20–100°C були виявлені закономірності відносних змін розміру зразка β у повздовжній орієнтації:

$$\beta = 0,2 \cdot 10^{-4} (t^{\circ} - 20^{\circ}C), \text{ коли } 20^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 37^{\circ}C$$

$$\beta = 3,1 \cdot 10^{-4}, \text{ коли } 37^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 73^{\circ}C$$

$$\beta = 3,1 \cdot 10^{-4} - 0,16 \cdot 10^{-4} (t^{\circ} - 73^{\circ}C), \text{ коли } 73^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 92^{\circ}C$$

$$\beta = -0,8 \cdot 10^{-4} (t^{\circ} - 92^{\circ}C), \text{ коли } 92^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 100^{\circ}C$$

2. Знайдено температурну залежність коефіцієнта температурного розширення α для ККТ, коли зразок був орієнтований у повздовжньому напрямку:

$$\alpha = (41 - 1,17 \cdot t^{\circ}) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 0^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 17^{\circ}C$$

$$\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 17^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 32^{\circ}C$$

$$\alpha = (52 - t^{\circ}) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 32^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 57^{\circ}C$$

і для всього інтервалу досліджуваних температур:

$$\alpha = (41 - 0,8 \cdot t^{\circ}) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ коли } 0^{\circ}C \leq t^{\circ} \leq 57^{\circ}C.$$

3. Установлена анізотропність відносних змін зразків при їх дегідратації на повітрі при кімнатних умовах. З'ясовано, що після 10 год дегідратації відносні зміни розмірів для зразків радіальної та тангенціальної орієнтації становили $(4-5) \cdot 10^{-3}$, а для повздовжньої орієнтації були значно менші – $0,6 \cdot 10^{-3}$, при цьому об'єм зразка зменшився на 0,9 %.

4. При вивченні відносного подовження зразка при температурах 10–39°C було виявлено гістерезисні явища, а повторні теплові навантаження мали деякі відмінності від попередніх, і для їх пояснення необхідні додаткові експерименти.

V.P. Popov, A.K. Kadurin

ABOUT TEMPERATURE EXPANSION COMPACT BONE TISSUE

In clause were studied dilametric properties of a compact bone fabric of the person.

Complex dependence of change of the sizes of a bone sample is revealed at his gradual heating. Laws of the relative sizes and Factors of temperature expansion are received at heating a bone fabric on air and un water, and also dilametry at degidration of bone tissue.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Янсон Х.А., Кнетс И.В., Саулгозис Ю.Ж. Физиологическое значение изменения объема //Механика полимеров. – 1974. – №4. – С. 695–703.
2. Кадурін О.К., Попов В.П. Температурне розширення компактної кісткової тканини //Медицина. – 2004. – №1 (10). – С. 46–48.
3. Кадурін О.К., Леонтьєва Ф.С. Закономірність дегідратації кісткової тканини //Трансплантологія. – 2003. – 4, №1. – С. 251–253.
4. Деклараційний патент України №67512 Спосіб визначення температури дегідратації кісткової тканини /Кадурін О.К., Леонтьєва Ф.С., Лигун Л.М., Вирва О.Є. //Промислова власність. – 2004. – Бюл. №6.
5. Blanton P.L., Biggs N.L. Density of fresh and embalmed human compact and cancellous bone //Amer. J. Physiol. – 1968. – 29(1). – P. 39–44.

Нац. ун-т ім. В.Н.Каразіна, Харків;

Ин-т патології хребта та суглобів ім. проф. М.І.Ситенка АМН України, Київ