XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania
Bydgoszcz - Pieczyska, maj 2008, ss. 225-229

Adam MAZURKIEWICZ, Tomasz TOPOLIŃSKI

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI I SZTYWNOŚCI KOŚCI W FUNKCJI JEJ STRUKTURY

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów wskaźników struktury oraz wybranych własności mechanicznych tkanki beleczkowej pobranej z kości ludzi chorych na osteoporozę, u których wystąpiły złamania kości udowej. W celu oszacowania związków pomiędzy badanymi wielkościami i zmian w wyniku choroby, uzyskane wyniki porównano z wynikami badań tych samych własności tkanki beleczkowej kości koksartrycznej, pobranej od pacjentów bez złamań kości.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Mechaniczny,
al. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

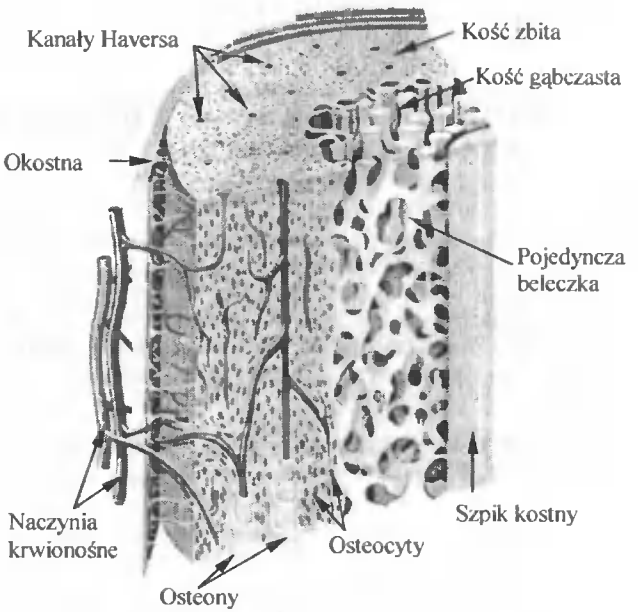
Kość jest materiałem kompozytowym o hierarchicznej budowie. W zależności od celu badania i przyjętej metodyki badaniom podlegają próbki o różnym kształcie i wielkości, począwszy od całych kości, poprzez próbki z nich wycięte, na pojedynczych włóknach kolagenu i kryształach hydroksyapatytu skończywszy.

Według literatury, np. [1-2], w budowie kości można wyróżnić pięć poziomów: makrostruktury, struktury (architektury), mikrostruktury, submikrostruktury oraz ultrastruktury. Na poziomie makrostruktury badane są całe kości, np. kość udowa czy piszczelowa, na poziomie struktury badaniu podlegają próbki wycięte z całych kości. Na poziomie mikrostruktury badaniom podlegają pojedyncze beleczki lub osteony, natomiast w substrukturze badane są blaszki kostne lub wiązki włókien kolagenu. W zakresie rozważań ultrastruktury rozpatrywane są własności pojedynczych włókien i składników mineralnych.

Na poziomie struktury badaniom podlegają próbki kości korowej, gąbczastej lub chrząstki stawowej. Z tkanki korowej jest zbudowana zewnętrzna warstwa kości, tkanka gąbczasta wypełnia wnętrze kości długich w ich nasadach oraz wnętrze kości krótkich. Chrząstka stawowa jest zewnętrzną warstwą kości w miejscach ich połączenia z innymi kośćmi – w stawach. Budowę makroskopową kości przedstawiono na rysunku 1.

Jakość tkanki beleczkowej ma decydujący wpływ na wytrzymałość całych kości [1-3]. Zadaniem tej tkanki jest równomierny rozkład obciążeń przenoszonych z powierzchni stawowych na trzony kości. Podczas osteoporozy to właśnie w tej części kości dochodzi do największych zmian, tj. utraty beleczek kostnych oraz zaburzeń ich architektury. Lokalne zaburzenia struktury beleczek prowadzą do powstania w tym miejscu spiętrzenia naprężeń, a w efekcie do przekroczenia wytrzymałości doraźnej i powstania pęknięcia. Prowadzi to do znacznego zmniejszenia wytrzymałości całej kości.

Celem pracy było znalezienie związków pomiędzy budową a wytrzymałością tkanki gąbczastej na poziomie struktury. W pracy przedstawiono wyniki pomiaru wybranych wskaźników struktury oraz modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie, a także związki występujące pomiędzy tymi wielkościami.



Rys. 1. Budowa makroskopowa kości

2. MATERIAŁ I METODY

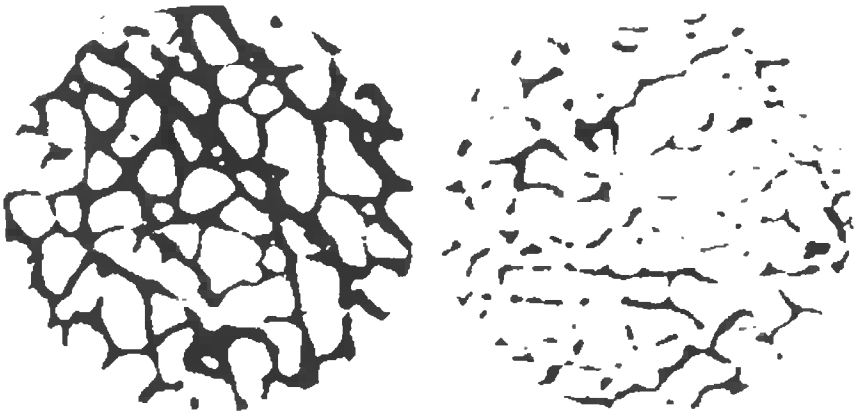
Materiał do badań stanowiły 42 próbki kości beleczkowej pobrane z głów ludzkiej kości udowej. Z badanych próbek 21 pochodziło z głów kości koksartrycznej, pozostałe z osteoporotycznej. Kości koksartryczne, w których nie wystąpiły złamania zostały przyjęte jako grupa kontrolna zamiast kości zdrowych. Próbki miały średnicę 10 mm i wysokość 8,5 mm. Sposób pobrania próbek opisano w [4]. Próbki były przechowywane w formalinie w temperaturze 6°C.

3. WSKAŹNIKI OPISUJĄCE STRUKTURĘ KOŚCI BELECZKOWEJ

Na potrzeby opisu struktury kości są używane wskaźniki zaproponowane w pracy [5]. Wskaźniki te zostały uznane za normę w opisie budowy kości i są powszechnie stosowane. W niniejszej pracy przyjęto wybrane z nich, tj.:

- Tb.N – trabecular number – średnia liczba ciągłych beleczek na jednostkę próbki,
- Tb.Th – trabecular thickness – średnia grubość beleczki w próbce,
- Tb.Sp – trabecular separate – średnia odległość pomiędzy beleczkami w próbce,
- BS/BV – stosunek pola powierzchni tkanki do objętości tkanki w próbce,
- BV/TV – stopień wypełnienia objętości próbki objętością tkanki.

Pomiar parametrów morfologicznych przeprowadzono na mikrotomografie μCT80. Na rysunku 2 przedstawiono otrzymane z mikrotomografu przykładowe obrazy pojedynczej warstwy (przekroju prostopadłego do osi) z dwóch próbek kości o różnej budowie beleczek. Urządzenie jest w stanie zobrazować warstwy próbki odległe od siebie o 36 μm.



Rys. 2. Przykładowe obrazy pojedynczej warstwy z różnych próbek kości otrzymane z mikrotomografu

Pomiar modułu Younga Mm i wytrzymałości na ściskanie próbek US przeprowadzono w statycznej próbie ściskania na maszynie wytrzymałościowej MTS. Prędkość odkształcenia wynosiła 1 mm/min. Dla każdej próbki określono moduł sprężystości oraz umowną wytrzymałość na ściskanie próbek, definiowaną jako pierwsze maksimum na krzywej ściskania. Szczegółowy opis warunków prowadzenia próby przestawiono w [4].

4. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 zestawiono zakres, wartości średnie oraz wartość odchylenia standardowego wyników pomiarów wybranych wskaźników struktury (tab. 1) oraz modułu i wytrzymałości na ściskanie (tab. 2).

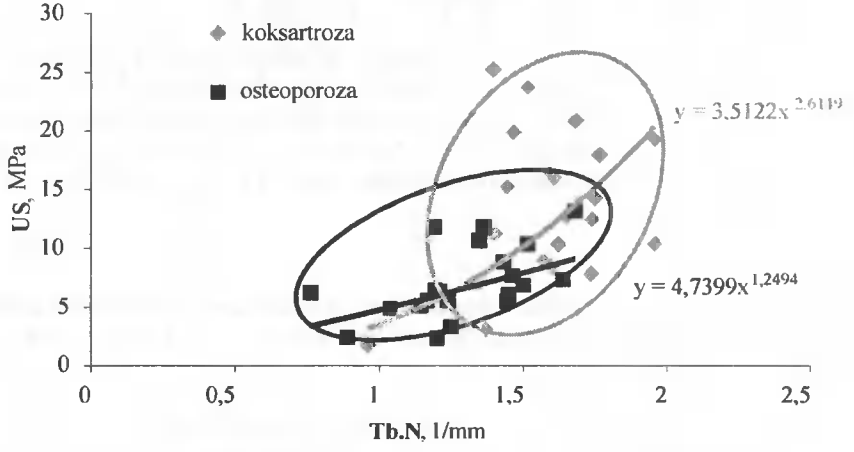
Tabela 1. Zestawienie zakresów wartości wskaźników dla obu grup próbek

Wskaźnik		Wartość	
		osteoporoza	koksartroza
Tb.N, 1/mm	zakres	0,760÷1,680	0,961÷1,958
	średnia	1,290	1,582
	SD	0,229	0,219
Tb.Sp, mm	zakres	0,380÷1,223	0,331÷0,928
	średnia	0,664	0,481
	SD	0,192	0,124
Tb.Th, mm	zakres	0,089÷0,230	0,113÷0,259
	średnia	0,139	0,164
	SD	0,031	0,037
BS/BV, 1/mm	zakres	8,686÷22,505	7,737÷17,646
	średnia	15,024	12,783
	SD	3,080	2,604
BV/TV, –	zakres	0,068÷0,377	0,109÷0,392
	średnia	0,185	0,260
	SD	0,071	0,070
SD – odchylenie standardowe			

Tabela 2. Zestawienie zakresów wartości modułu i wytrzymałości na ściskanie dla obu grup próbek

Wskaźnik		Wartość	
		osteoporoza	koksartroza
Mm, MPa	zakres	41,2÷446,7	59,3÷920,1
	średnia	281,3	562,2
	SD	119,370	315,905
US, MPa	zakres	2,329÷13,105	1,678÷25,288
	średnia	7,046	13,366
	SD	3,052	6,448
SD – odchylenie standardowe			

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową zależność pomiędzy średnią liczbą beleczek a wytrzymałością na ściskanie w obu badanych grupach próbek. W tabeli 3 przedstawiono wartości współczynników korelacji R uzyskane dla związków pomiędzy wskaźnikami struktury a modułem i wytrzymałością w obu grupach próbek.



Rys. 3. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie US a średnią liczbą beleczek Tb.N

Tabela 3. Wartości współczynników korelacji R

Osteoporoza					
Wskaźnik	Tb.N 1/mm	Tb.Sp mm	Tb.Th mm	BS/BV 1/mm	BV/TV –
Mm, MPa	0,27	–0,28	0,32	–0,33	0,31
US, MPa	0,61	–0,61	0,47	–0,45	0,59
Koksartroza					
Wskaźnik	Tb.N 1/mm	Tb.Sp mm	Tb.Th mm	BS/BV 1/mm	BV/TV –
Mm, MPa	0,36	–0,52	0,54	–0,61	0,59
US, MPa	0,31	–0,59	0,79	–0,81	0,76

5. DYSKUSJA

Wytrzymałość próbek kości koksartrycznych jest wyższa od wytrzymałości próbek osteoporotycznych średnio o 89%, moduł sprężystości o 100%, średnia ilość beleczek o 22%, średnia grubość beleczek o 18%, iloraz BV/TV o 41%. Natomiast średnia odległość pomiędzy beleczkami jest mniejsza o 38%, a wartość ilorazu BS/BV mniejsza o 18%.

Uzyskane wartości współczynnika korelacji R dla analizowanych zależności są zwykle wyższe w grupie próbek koksartrycznych, tj. dla kości zasadniczo różnych jedynie cechami osobniczymi. Wartości bezwzględne uzyskanych współczynników korelacji R mieszczą się w zakresach 0,36÷0,61 i 0,31÷0,81 odpowiednio dla modułu i wytrzymałości na ściskanie próbek koksartrycznych oraz 0,27÷0,33 i 0,45÷0,61 dla próbek osteoporotycznych.

Także w obu grupach próbek silniejsze zależności występują dla związków wskaźników struktury z wytrzymałością na ściskanie niż z modułem sprężystości.

Prawdopodobnie wynika to z faktu, że pomiar modułu był wykonany przy znacznie mniejszych odkształceniach i wartościach siły. W takim przypadku błędy pomiarowe mogły mieć dużo większy wpływ na wynik pomiaru, niż w przypadku pomiaru wytrzymałości na ściskanie.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową zależność pomiędzy średnią liczbą beleczek w próbkach a wytrzymałością na ściskanie. Zależność ta jest reprezentatywna dla otrzymanych wyników. W większości przypadków poszczególne wyniki tworzą raczej chmury punktów, czy też pewne obszary w niektórych przypadkach częściowo się pokrywające, niż ścisłe zależności.

Podsumowując można stwierdzić, że na podstawie wyników przeprowadzonych badań nie udało się wykazać wyraźnych związków pomiędzy strukturą a wytrzymałością kości, zwłaszcza w przypadku próbek osteoporotycznych. Maksymalny współczynnik korelacji w tej grupie próbek wyniósł 0,61. Prawdopodobnie jest to spowodowane tym, że struktura próbek osteoporotycznych jest tak zniszczona na skutek choroby, że wykrycie tych zależności było niemożliwe.

Wydaje się, że siłę uzyskanych zależności poprawiłaby selekcja posiadanego materiału badawczego na podgrupy, np. w określone przedziały wiekowe, ze względu na płeć pacjentów, bądź jeszcze inne. Niestety, z uwagi na oczywiste problemy z pozyskaniem materiału badawczego nie było to możliwe, gdyż podczas prób takiej selekcji ze względu na różne kryteria nie uzyskano porównywalnej ilości próbek w podgrupach. Celowe zatem wydaje się przeprowadzenie podobnych badań następnej partii próbek, w celu weryfikacji otrzymanych wyników i potwierdzenia bądź odrzucenia otrzymanych zależności.

LITERATURA

[1] Cowin S.C. i inni, 2001. Bone mechanics handbook. CRC Press New York.
[2] Draughn R., Yuehuei A., 2001. Mechanical testing of bone and the bone-implant interface. CRC Press New York.
[3] Badurski J. i inni, 1996. Osteoporoza. Osteoprint.
[4] Mazurkiewicz A., 2007. Badanie wpływu wybranej struktury na jej wytrzymałość jako element diagnozowania nośności kości. Rozprawa doktorska, UTP Bydgoszcz.
[5] Parfitt A. i inni, 1987. Bone histomorphometry: Standarization of nomenclature, symbols and units. Journal of Bone and Mineral Research 6.