

Małgorzata CYKOWSKA, Zakład Mechatroniki, Automatykacji Organizacji Produkcji, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Politechnika Wrocławska, Wrocław

Anna NIKODEM, Zakład Inżynierii Biomedycznej i Mechaniki Eksperymentalnej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska, Wrocław

BADANIE REOLOGICZNE TKANKI CHRZĘSTNEJ ŁĘKOTEK POCHODZĄCYCH OD ZWIERZĄT RÓŻNYCH GATUNKÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych tkanki chrzęstnej. Przeprowadzone badania pozwoliły wyznaczyć krzywą pełzania dla tkanki chrzęstnej łąkotek świni i bukata. Określone zostały także właściwości mechaniczne chrząstki stawowej. W trakcie badań zauważono, że różnice w budowie strukturalnej chrząstki stawowej pochodzących od zwierząt różnych gatunków wpływają na zachowanie się materiału oraz na wyniki pomiarów.

1. WSTĘP

Tkanka chrzęstna należy do tkanek łącznych, pokrywa ona powierzchnie stawowe każdej z kości tworzących staw, znajduje się również w krtani, tchawicy, oskrzelach, uszach oraz nosie. Chrząstka stawowa w swojej budowie zawiera: 75-80% wody, 15-20% macierzy chrzęstnej oraz około 0,1% komórek chrzęstnych (chondrocytów). Macierz chrząstki zbudowana jest z kolagenu, który stanowi około 65%, proteoglikanów (25%), glikoprotein (5%) oraz lipidów (5%) [1].

Chrząstka stawowa pokrywająca nasady kości, nie ma idealnie gładkiej powierzchni. Głównymi funkcjami chrząstki stawowej są: amortyzacja obciążeń oraz zapewnienie równomiernego rozkładu obciążeń w stawie.

Właściwości mechaniczne tkanki chrzęstnej można określić za pomocą badań reologicznych, które polegają na analizie zmiany odkształcenia w funkcji czasu po przyłożeniu stałego obciążenia, badania te prowadzi się w celu lepszego poznania mechanizmów przenoszenia obciążeń przez staw.

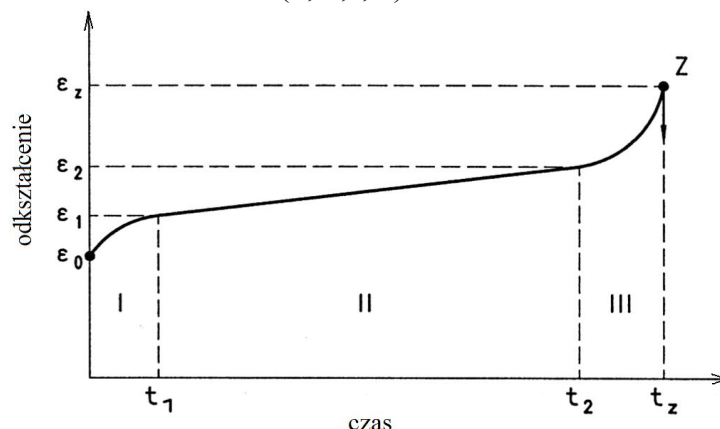
Łącząc, zaproponowane w literaturze [2,7] modele z wynikami badań doświadczalnych prowadzonych najczęściej w testach reologicznych tkanki chrzęstnej możemy uzyskać bardziej kompletny opis, który pozwoli w pełni zrozumieć zachowanie chrząstki pod obciążeniem.

Reologia jest nauką o odkształcaniu się ciał stałych, która zajmuje się opisem zachowania się danego ciała w sposób ciągły. Przykładami właściwości reologicznych są:

- plastyczność – zdolność ciał stałych do ulegania nieodwracalnym odkształceniom po przyłożeniu siły zewnętrznej;
- sprężystość – zdolność materiału do odzyskiwania pierwotnego kształtu po usunięciu sił działających na materiał;
- lepkość – właściwość ciał plastycznych oraz płynów, opierająca się na naprężeniach wewnętrznych przeciw płynięciu [8]

Badania reologiczne prowadzi się w testach pełzania i relaksacji. Zjawisko relaksacji polega na powolnych zmianach wartości naprężeń towarzyszących utrzymującym się przez dłuższy okres stałym odkształceniom. Spadek naprężeń, będący wynikiem relaksacji, obniża nośność konstrukcji. Zjawisko pełzania występuje, gdy materiał odkształca się wraz z upływem czasu przy zadanym stałym obciążeniu. Pełzanie zależy od różnych czynników takich jak czas, temperatura, odkształcenia i naprężenia, co przedstawia wzór (1).

$$F(\varepsilon, \sigma, t, T) = 0 \quad (1)$$



Rys. 1 Przykładowa krzywa pełzania materiału charakteryzująca się trzema stadiami pełzania

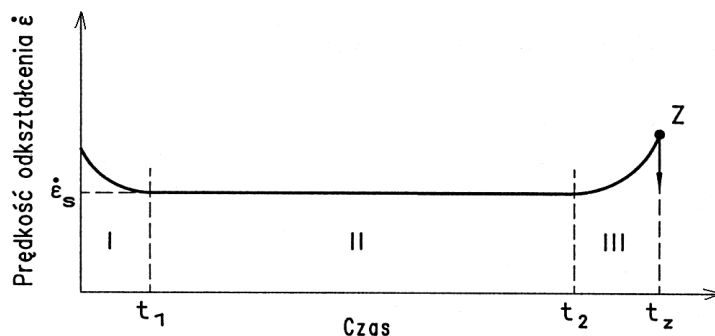
Przykładową pełną krzywą pełzania przedstawiono na rys.1. Krzywa ta charakteryzuje się trzema stadiami pełzania (I-III) oraz wartością Z, odpowiadającą zniszczeniu badanej próbki, przy czym ε_0 – jest to natychmiastowe odkształcenie próbki po przyłożeniu obciążenia. Krzywą pełzania możemy przedstawić za pomocą równania (2).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right] \quad (2)$$

gdzie:

$$\tau = \frac{\eta}{E}, \quad \eta - \text{lepkość}$$

Przedstawiona na rysunku 1 krzywa pełzania charakteryzuje się trzema stadiami pełzania, które opisują zmiany odkształcenia w czasie. Tym zmianom odpowiadają odpowiednio wartości odkształceń: ε_1 , ε_2 i ε_3 . Na rysunku 2 przedstawiono zmianę prędkości pełzania próbek dla poszczególnych stadiów tego zjawiska.

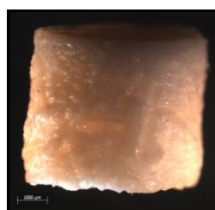


Rys. 2 Zmiana prędkości pełzania w czasie (Z- zniszczenie próbki) [2.6]

Pierwsze stadium pełzania charakteryzuje się dużą prędkością pełzania, które następnie stopniowo maleje i stabilizuje się do chwili rozpoczęcia drugiego stadium pełzania. W drugim stadium pełzania prędkość odkształcenia ma stałą wartość (od t_1 do t_2), następnie badany materiał przechodzi do trzeciego stadium, gdzie prędkość pełzania ponownie wzrasta, aż do momentu zniszczenia badanej próbki w czasie t_z , spowodowanego znacznym osłabieniem materiału. Początkowo w literaturze, proces ten wyjaśniany był jako wzrost naprężeń, spowodowany zmniejszeniem się powierzchni przekroju badanej próbki, jednak wykazano [2], że osłabienie materiału jest związane z powstaniem mikropęknięć (mikroporów), które pod wpływem stałego obciążenia i temperatury zwiększają swoją objętość.

2. METODYKA BADAŃ

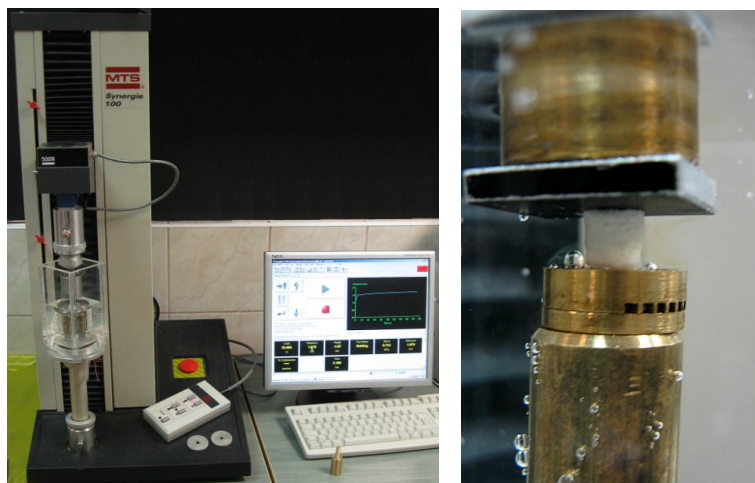
Materiałem użytym do badań była tkanka chrzęstna pochodząca z łąkotek świń i bukatów [3,4]. Z każdego preparatu przygotowano cylindryczne próbki o średnicy $\Phi=5\text{mm}$. W celu uzyskania dwóch równoległych powierzchni, wykorzystano specjalny wykrojnik z dwoma równoodległymi ostrzami, przez co uzyskano wysokość próbek $h=5\text{mm}$ (rys. 3). Badania przeprowadzono dla 102 próbek, z czego 57 stanowiły próbki przygotowane z łąkotki bukata a 45 z łąkotki świni.



Rys. 3. Przykładowa próbka, pobrana z łąkotki bukata

Z uwagi na fakt, iż właściwości mechaniczne materiałów biologicznych zależą od wielu dodatkowych czynników [5], a w przypadku tkanki chrzęstnej głównie od stopnia uwodnienia, próbki przechowywano w roztworze PBS [3]. W badaniach nie wykorzystywano roztworu 0,9% NaCl, co powodowałoby pęcznienie tkanki chrzęstnej, a tym samym mogło zmienić jej właściwości mechaniczne a roztwór PBS pozwala utrzymać stałe pH i jest nietoksyczny dla komórek.

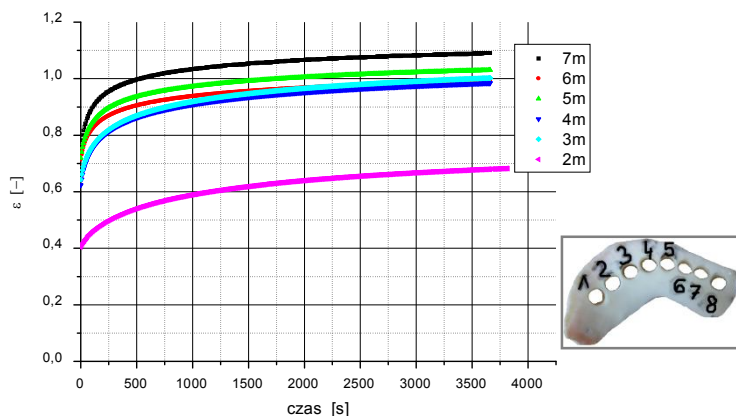
W celu określenia właściwości mechanicznych każdą z próbek poddano testowi pełzania. Badania przeprowadzono w teście jednoosiowego ściskania do wartości siły 30N, przez 60 min [6], z użyciem maszyny MTS Synergie 100. Z uwagi na budowę mikroskopową tkanki chrzęstnej (arkadowy układ włókien kolagenowych oraz obecność proteoglikanów) wymagane było zastosowanie specjalnych uchwytów i płytek dociskowych (rys.4).



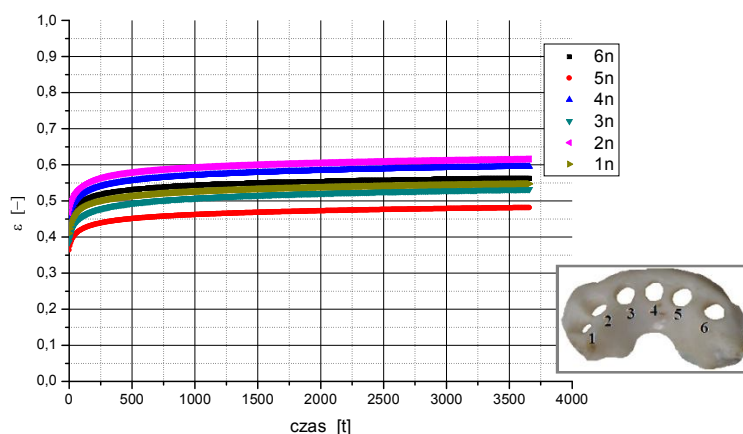
Rys. 4 Układ obciążający: maszyna MTS Synergie 100 wraz z uchwytami i płytkami

3. WYNIKI BADAŃ

Przykładowe charakterystyki pełzania przedstawiono na rys.5 i rys.6. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że krzywe te mają różny przebieg, w zależności od badanej próbki. Krzywe pełzania dla tkanki chrzęstnej łękotek świni i bukata mają również różne wartości odkształcenia początkowego ε_0 . Pod wpływem przyłożonej siły, próbki pobrane z łękotek świni odkształcają się znacznie szybciej niż próbki pobrane z łękotki bukata. Ponadto, można zauważyć, iż odkształcenie dla próbek łękotki bukata przez cały czas trwania badania (60 minut) rośnie. Na samym początku pomiaru obserwujemy dynamiczny wzrost odkształcenia (pierwsze stadium pełzania od ε_0 - ε_1), po czym następuje jednostajny wzrost w czasie, aż do momentu jego ustabilizowania (drugie stadium pełzania ε_1 - ε_2).

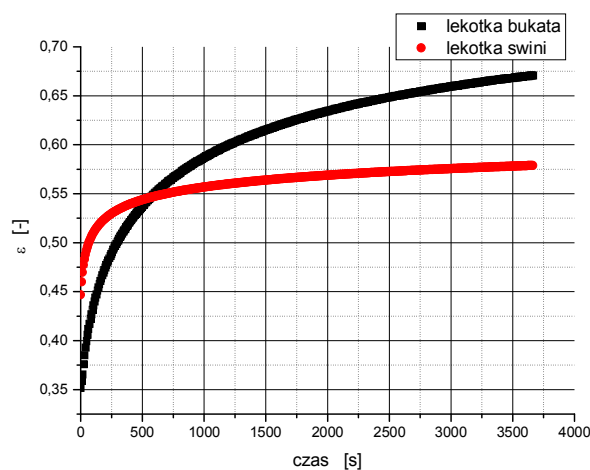


Rys. 5 Krzywe pełzania dla próbek pobranych z łękotki bukata



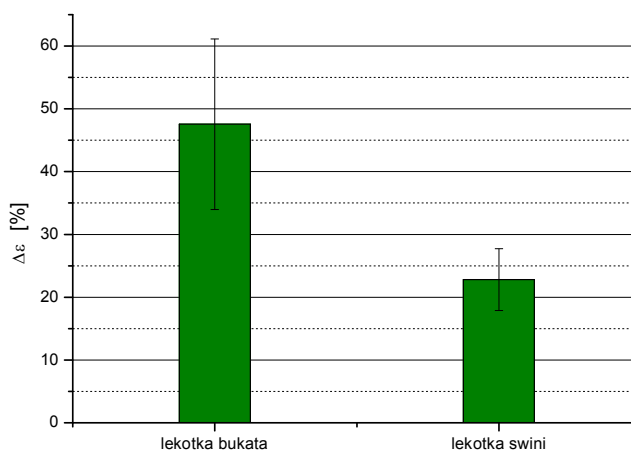
Rys. 6 Krzywe pełzania dla próbek pobranych z łąkotki świńskiej

Na rysunku (Rys. 7) zestawiono uśrednione wyniki uzyskane z badań reologicznych dla różnych gatunków.



Rys. 7. Uśrednione krzywa pełzania dla próbek różnych gatunków

Dla łąkotki świńskiej na początku badania widoczny jest szybki wzrost odkształcenia, który w późniejszym okresie czasu zmienia się tylko w niewielkim stopniu. Dlatego wydaje się, że w przypadku tkanki chrzęstnej, która jest tkanką wysoce odkształcalną badania reologiczne powinny być prowadzone w dłuższym okresie czasu.



Rys. 8. Porównanie wartości różnicy odkształceń dla próbek łąkotki różnych gatunków

Porównując wartości różnicy odkształceń próbek łąkotek dla różnych gatunków widać, że najbardziej odkształciły się próbki pobrane z łąkotki bukata, odkształcenie to wynosiło około 48%, natomiast najmniej odkształciły się chrząstki stawowe pobrane z łąkotek świni (23%). Różnica wartości odkształceń dla łąkotki bukata i świni wynosi aż 25%, stąd nasuwa się wniosek, że odkształcanie się chrząstki stawowej jest ściśle zależne od miejsca pobrania próbki.

4. WNIOSKI / Dyskusja

Badania mechaniczne tkanki chrzęstnej szczególnie wysoko odkształczanych łąkotek, mają dużą wagę, ze względu na częste urazy tych struktur, szczególnie w przypadku dużych przeciążeń (np. u sportowców). Przeprowadzone badania doświadczalne z wykorzystaniem modelu zwierzęcego na 2 różnych gatunkach udowodniły, że właściwości mechaniczne tkanki chrzęstnej bardzo mocno zależą od wielu czynników, nie tylko związanych z przygotowaniem próbek (tj. stopień uwodnienia struktury) ale przede wszystkim zależą od gatunku oraz miejsca pobrania próbki. Wartości odkształceń próbek przygotowanych z łąkotek świni i bukata różnią się nawet 25%. Zmienia się również sam charakter krzywych pełzania. Różna budowa strukturalna chrząstki stawowej wpływa na zachowanie się materiału w trakcie badań oraz na wyniki pomiarów.

LITERATURA

- [1]. Błaszczyk J., Biomechanika kliniczna, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2004.
- [2]. Jakowluk A., Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach, Wydawnictwo naukowo – techniczne, Warszawa 1993.
- [3]. Korhonen R. K., Jurvelin J. S., Compressive and tensile properties of articular cartilage in axial loading are modulated differently by osmotic environment, *Medical Engineering & Physics* 32(2), s. 155-160, 2009.
- [4]. Lai J.H., Levenston M.E., Meniscus and cartilage exhibit distinct intra-tissue strain distributions under unconfined compression, *Osteoarthritis and Cartilage* 18(10), s. 1291-1299, 2010.
- [5]. Nikodem A., Ściagała K., Impact of some external factors on the values of the mechanical parameters determined in tests of bone tissue. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 12(3), s. 85-93, 2010,
- [6]. Pickard J., Ingham E., Egan J., Fisher J., Investigation into the effect of proteoglycan molecules on the tribological properties of cartilage joint tissues, *Journal of Engineering in Medicine* 212(3), s. 177-182, 1998.
- [7]. http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/bolek/Diagnostyka/D_Mech_3.ppt
- [8]. <http://www.instron.pl/wa/glossary/Plasticity.aspx>

RHEOLOGICAL STUDIES OF THE MENISCUS CARTILAGE FROM DIFFERENT SPECIES