

BADANIE HISTEREZY MECHANICZNEJ ŚCIĘGIEN WIEPRZOWYCH

ANETA LIBER-KNEĆ*, SYLWIA ŁAGAN

ZAKŁAD MECHANIKI DOŚWIADCZALNEJ I BIOMECHANIKI,
INSTYTUT MECHANIKI STOSOWANEJ, POLITECHNIKA KRAKOWSKA,
AL. JANA PAWŁA II 37, 31-864 KRAKÓW

* E-MAIL: ALIBER@PK.EDU.PL

Abstrakt

Ściągna mogą być czasowo lub trwale uszkodzone w warunkach nadmiernego obciążenia lub obciążenia przyłożonego z dużą szybkością. Z punktu widzenia decyzji chirurga istotnym jest przewidywanie intensywności uszkodzeń ścięgien. Można to zrobić poprzez określenie i zrozumienie odpowiedzi mechanicznej i rodzajów uszkodzeń ścięgien pod wpływem działania obciążenia. Jedną z ważnych cech ścięgien jest histereza mechaniczna, która określa zdolność ścięgna do rozpraszania energii, co oznacza, że napięcie mięśni nie jest w pełni przenoszone na szkielet. Badania przeprowadzono w celu określenia histerezy mechanicznej w modelu ścięgien wieprzowych w warunkach cyklicznego obciążenia w próbie quasi-statycznego rozciągania. Wykonano dziesięć cykli obciążenia-odciążenia w teście quasi-statycznego rozciągania dla trzech poziomów maksymalnego obciążenia: 50 N, 100 N i 150 N. Dla każdego poziomu obciążenia zarejestrowano trzy pętle histerezy (pierwszą, piątą, dziesiątą) i na ich podstawie obliczono wartości energii dyssypacji i histerezy mechanicznej. Średnie wartości energii rozpraszania wyniosły $4,4 \pm 0,7$ mJ, $19,7 \pm 3,7$ mJ, $23,9 \pm 3,9$ mJ odpowiednio dla poziomów obciążenia 50, 100 i 150 N. Między piątym a dziesiątym cyklem, dla których zaobserwowano stabilizację energii rozpraszanej, wartości te wynosiły od 22 do 32%, co stanowiło połowę wartości histerezy dla pierwszego cyklu. Zaobserwowano wpływ zastosowanych obciążeń na wartości, zarówno energii dyssypacji, jak i energii zwróconej. Wpływu tego nie zaobserwowano na wartość histerezy mechanicznej.

Słowa kluczowe: histereza mechaniczna, ścięgno wieprzowe, energia dyssypacji, lepkosprężystość

[Inżynieria Biomateriałów 139 (2017) 26-30]

Wprowadzenie

Podstawową rolą ścięgien jest przenoszenie sił skurczowych pomiędzy kośćmi w celu generowania ruchu stawów. Ściągna zbudowane są z sieci włókien kolagenowych w uwodnionej osnowie z elastyny i proteoglikanów. Włókna kolagenowe nadają ścięgnom wytrzymałość, podczas gdy elastyna zapewnia elastyczność, tak jak osnowa w materiale kompozytowym. Właściwości mechaniczne większości tkanek miękkich, również ścięgien, są opisane jako niejednorodne, anizotropowe, nieliniowe i lepkosprężyste [1,2].

W warunkach nadmiernych obciążeń i ich dużych prędkości, ściągna mogą zostać czasowo lub trwale uszkodzone. Z punktu widzenia decyzji chirurga istotnym jest przewidywanie intensywności uszkodzeń ścięgien. Można to zrobić poprzez określenie i zrozumienia odpowiedzi mechanicznej i rodzajów uszkodzeń ścięgien pod wpływem działania obciążenia [1].

MECHANICAL HYSTERESIS TESTS FOR PORCINE TENDONS

ANETA LIBER-KNEĆ*, SYLWIA ŁAGAN

DIVISION OF EXPERIMENTAL MECHANICS AND BIOMECHANICS,
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING,
CRACOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY,
AL. JANA PAWŁA II 37, 31-864 KRAKÓW, POLAND

* E-MAIL: ALIBER@PK.EDU.PL

Abstract

Tendons may be temporarily or permanently damaged under conditions of excessive high-rate loading. It is important for surgery decisions to predict the intensity of tendons injures. It can be done by the determination and understanding of the mechanical response and the failure modes of tendons under loading. One of the important issues concerned with tendons is mechanical hysteresis, demonstrating the ability of the tendon to dissipate energy, which indicates that the muscular tension is not fully transmitted to the skeleton. The aim of the study was to determine mechanical hysteresis of porcine tendons model under cyclic loading in the quasi-static tensile test. Repeated ten loading-unloading cycles in the quasi-linear tensile test were made for three levels of the maximal load: 50 N, 100 N and 150 N. Three hysteresis loops for each level of load were registered (1st, 5th, 10th) and used for calculation the values of energy dissipation and mechanical hysteresis. The mean values of energy dissipation were 4.4 ± 0.7 mJ, 19.7 ± 3.7 mJ, 23.9 ± 3.9 mJ for load levels 50, 100 and 150 N, respectively. Between fifth and tenth cycle for which the stabilization of the mechanical hysteresis was observed, its values were between 22 and 32%, what was about half of the hysteresis value for the first cycle. The influence of the applied loads on the values of both the energy of dissipation and the returned energy can be seen but the value of mechanical hysteresis is independent of load levels.

Keywords: mechanical hysteresis, porcine tendon, energy of dissipation, viscoelasticity

[Engineering of Biomaterials 139 (2017) 26-30]

Introduction

The primary role of tendons is to transmit contractile forces between the bones to generate joint movement. Tendons are composed of a network of collagen fibrils in a hydrated matrix of elastin and proteoglycans. Collagen fibrils provide strength to the tendon while elastin provides flexibility as matrix of a composite material. Mechanical behavior of the most soft tissues, also tendons, is described as inhomogeneous, anisotropic, nonlinear and viscoelastic [1,2].

High rate and excessive conditions of a load cause that tendons may be temporarily or permanently damaged. It is important for surgery decisions to predict the intensity of tendons injures. It can be done by the determination and understanding of the mechanical response and the failure types of tendons under loading [1]. Many eventual failures are tensile in nature, so properties under the quasi-static tension have been the subject of several investigations.

Wiele ewentualnych uszkodzeń ścięgien następuje w wyniku rozciągania, dlatego ocena właściwości pod wpływem działania quasi-statycznej siły rozciągającej była przedmiotem wielu badań. Dla ludzkiego ścięgna Achillesa w badaniach *in vitro*, uzyskano wartość modułu Younga w zakresie od 1 do 2 GPa, natomiast wartość maksymalnego naprężenia na poziomie około 100 MPa. Wyniki uzyskane *in vivo* różnią się znacząco w porównaniu z testami *in vitro*. Wartość modułu Younga wynosi od 0,3 do 1,4 GPa, wartość naprężenia zawiera się pomiędzy 20 i 42 MPa [2].

Jedną z ważnych kwestii dotyczących ścięgien jest histereza mechaniczna, która określa zdolność ścięgna do rozpraszania energii. Energia dyssypacji oznacza, że napięcie mięśni nie jest w pełni przenoszone na szkielet. Pomiar zdolności ścięgien do pochłaniania i efektywnego zwracania energii podczas ruchu pozwala na ocenę termicznego zniszczenia oraz ilości energii metabolicznej, która podczas ruchu może być zaoszczędzona. Jest to ważne z punktu widzenia biomechaniki sportu oraz rehabilitacji [1,3-5].

Badania zostały przeprowadzone w celu określenia histerezy mechanicznej ścięgien wieprzowych w warunkach cyklicznego obciążenia realizowanego w teście quasi-statycznego rozciągania. Model ścięgna wieprzowego jest powszechnie wykorzystywany w badaniach biomechanicznych różnych technik rekonstrukcji przeszczepów ścięgien [6].

Materiał i Metody

W badaniach wykorzystano piętnaście ścięgien pobranych z kończyn w pełni dorosłych świń domowych o masie około 100 kg. Ścięgna owinięto w folię polipropylenową i zamrożono w temperaturze $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ do momentu badania i następnie rozmrożono w temperaturze pokojowej ($23 \pm 1^\circ\text{C}$), jedną godzinę przed testem. Średnia średnica badanych ścięgien wynosiła $6,4 \pm 0,9$ mm.

Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie testu rozciągania w celu charakterystyki materiału. Właściwości mechaniczne w teście statycznego rozciągania zostały określone przy użyciu maszyny MTS Insight 50. Próbkę zamocowano za pomocą płaskich zacisków i wydłużano z prędkością 5 mm/min. Długość pomiarowa próbki wynosiła 50 mm. Wartości oznaczonych parametrów mechanicznych: moduł Younga oraz wytrzymałość na rozciąganie, zostały przedstawione jako wartości średnie z odchyleniem standardowym ($X \pm \text{SD}$).

Następnie wykonano dziesięć cykli obciążenia-odciążenia w teście quasi-liniowego rozciągania dla trzech poziomów maksymalnego obciążenia: 50 N, 100 N, 150 N. Wartości obciążenia zostały dobrane na podstawie wyników testu rozciągania w zakresie odkształceń sprężystych ścięgien świni. Badanie przeprowadzono przy użyciu maszyny MTS Insight 50 ze stałą prędkością wydłużenia 5 mm/min. Długość początkowa próbki wynosiła 50 mm. Dla każdego poziomu obciążenia zarejestrowano trzy pętle histerezy mechanicznej (pierwszą, piątą i dziesiątą), które wykorzystano do obliczenia wartości:

- energii dyssypacji (powierzchnia pętli),
- całkowitej pracy wykonanej podczas rozciągania ścięgna (powierzchnia pod krzywą przy zwiększającym się odkształceniu),
- energii zwróconej (powierzchnia pod krzywą przy zmniejszającym się odkształceniu),
- histerezy mechanicznej (część energii odkształcenia, która jest rozpraszana poprzez wewnętrzne tłumienie lepkie w każdym cyklu wydłużenia [7]. Została ona obliczona jako stosunek powierzchni pętli (energia odkształcenie rozpraszona) do powierzchni pod krzywą obciążenia (energia odkształcenia zużyta).

Dla każdego poziomu obciążenia wykorzystano dwie próbki. Wartości obliczonych energii zostały pokazane jako średnie z odchyleniem standardowym ($X \pm \text{SD}$).

For the human Achilles tendon tested *in vitro*, the value of Young's modulus ranges between 1 and 2 GPa, while the value of the ultimate stress is approximately 100 MPa. Results obtained *in vivo* differ significantly in comparison to the *in vitro* tests. The value of Young's modulus is between 0.3 and 1.4 GPa, while the value of the ultimate stress ranges between 20 and 42 MPa [2].

One of the important issues concerned with tendons is the mechanical hysteresis, demonstrating the ability of the tendon to dissipate energy. This energy dissipation indicates that the muscular tension is not fully transmitted to the skeleton. The measurement of the tendons ability to store and efficiently return energy during locomotion, allows to assess tendons thermal damage and the amount of metabolic energy that can be saved during locomotion, what is important for biomechanics of sport or rehabilitation [1,3-5]. The porcine tendon model is commonly used for the biomechanical investigation of various reconstruction techniques of tendon grafts [6].

The study was conducted to determine mechanical hysteresis of porcine tendons under cyclic loading in the quasi-static tensile test.

Materials and Methods

Fifteen tendons taken from the lower limbs from fully mature domestic pigs, weighting approximately 100 kg were used in this investigation. Tendons were wrapped in polypropylene foil and frozen at $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ until the tensile testing, and then thawed at room temperature ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) one hour prior the experiment. The average diameter of tested tendons was 6.4 ± 0.9 mm.

First step of the investigations was conducting the tensile test to characterize the material. The mechanical properties under the static tension were determined with the use of the MTS Insight 50 testing machine. The samples were mounted using flat clamps and they were extended at the speed of 5 mm/min. The measurement base of the samples was 50 mm. The determined values of mechanical parameters: Young's modulus and the tensile strength were shown as the mean values (nine specimens) with a standard deviation ($X \pm \text{SD}$).

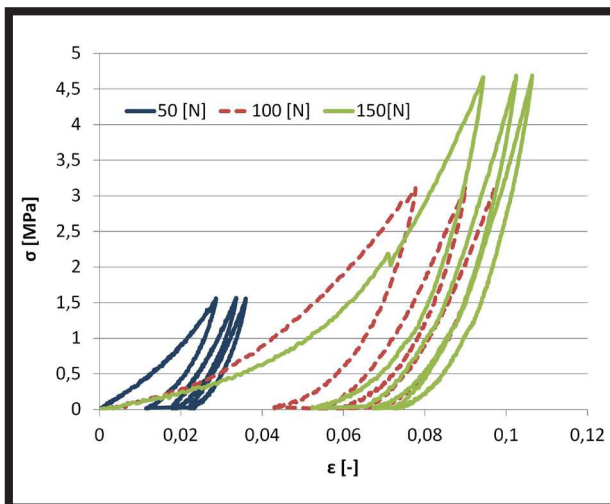
Then, repeated ten loading-unloading cycles in the quasi-linear tensile test were made for three levels of the maximal load: 50 N, 100 N and 150 N. The values of the load were chosen on the base of the tensile test results, within the elastic strain limit of the pig's tendon. The test was made with the use of MTS Insight 50 testing machine at a constant rate of elongation 5 mm/min. The initial samples length was 50 mm. Three mechanical hysteresis loops for each level of load were registered (1st, 5th, 10th) and used for calculation the value of:

- dissipated energy (the area of the loop),
- total work performed on the tendon during stretching (the area under curve for increasing strain),
- energy returned (the area under curve for decreasing strain),
- mechanical hysteresis (the proportion of strain energy that is dissipated by internal viscous damping in each extension cycle [7]. It was calculated as the ratio of the area within the stress-strain loop (strain energy dissipated) to the area beneath the load portion of the curve (strain energy input).

Two samples for each load level were used. The calculated values of energies were shown as the mean values with a standard deviation ($X \pm \text{SD}$).

Wartość modułu sprężystości dla badanych ścięgien wieprzowych wyniosła 256 ± 47 MPa, wartość wytrzymałości na rozciąganie wyniosła $16,1 \pm 2,2$ MPa.

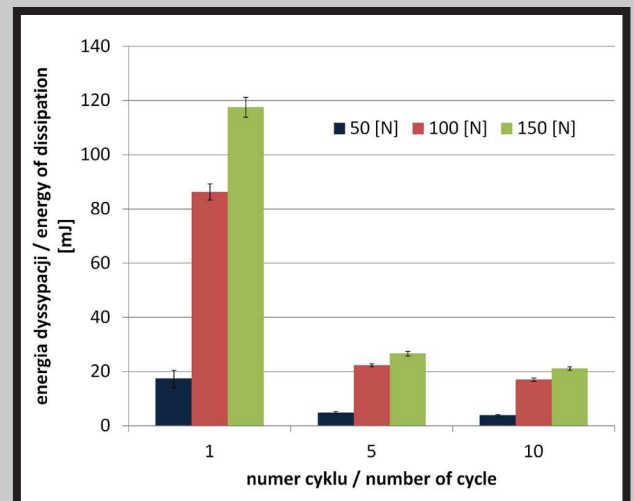
Na RYS. 1 pokazano pętle histerezy mechanicznej dla ścięgien wieprzowych dla trzech poziomów obciążenia. Dla wszystkich poziomów obciążenia, powierzchnia pętli histerezy w pierwszym cyklu obciążenia-odciążenia była znacznie większa, ale zmniejszała się szybko po tym cyklu i pomiędzy piątym i dziesiątym cyklem stawała się prawie stała, co koreluje ze stanem po kondycjonowaniu ścięgien. Wartości energii dyssypacji były najwyższe w pierwszym cyklu obciążenia-odciążenia dla wszystkich poziomów obciążenia (RYS. 2). Oznacza to, że w pierwszym cyklu niska wartość energii pochłoniętej podczas odkształcenia została zwrócona po tym jak obciążenie zostało usunięte. Pomiedzy piątym i dziesiątym cyklem obciążenia-odciążenia zaobserwowano stabilizację wartości energii dyssypacji. Średnie wartości energii dyssypacji dla zarejestrowanych cykli wyniosły $4,4 \pm 0,7$ mJ, $19,7 \pm 3,7$ mJ, $23,9 \pm 3,9$ mJ dla poziomów obciążenia odpowiednio 50, 100 i 150 N. Wartości energii dyssypacji w piątym cyklu były niższe w przybliżeniu o 72, 74 i 77% dla poziomów obciążenia odpowiednio 50, 100 i 150 N w porównaniu do pierwszego cyklu. Wartości te w dziesiątym cyklu były niższe w przybliżeniu o 77, 80 i 82% dla poziomów obciążenia odpowiednio 50, 100 i 150 N w porównaniu do pierwszego cyklu. W przypadku wartości energii zwróconej podczas odciążenia ścięgien, różnice pomiędzy poszczególnymi cyklami są mniej znaczące (RYS. 3). Różnice w wartościach energii wróconej pomiędzy piątym i dziesiątym cyklem wyniosły w przybliżeniu 17, 11 i 7% dla poziomów obciążenia odpowiednio 50, 100 i 150 N. Pomiedzy piątym i dziesiątym cyklem obciążenia-odciążenia, większość energii pochłoniętej podczas odkształcenia została zwrócona, kiedy obciążenie rozciągające zostało usunięte. Zauważono wpływ zastosowanego obciążenia na wartości, zarówno energii dyssypacji, jak i energii zwróconej. Tego rodzaju zależności nie zaobserwowano dla wartości histerezy mechanicznej (RYS. 4).



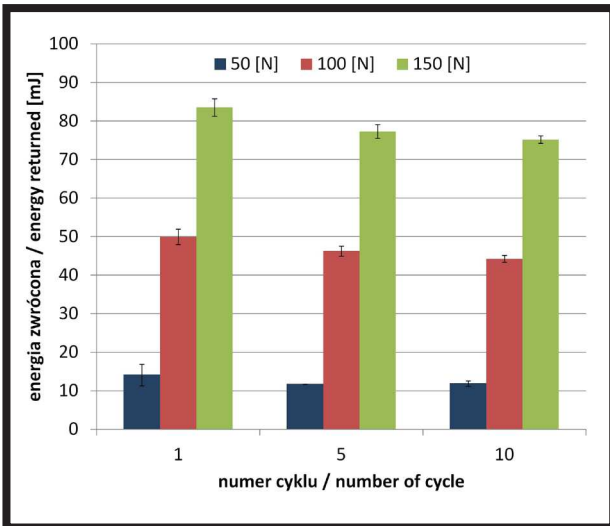
RYS. 1. Pętle histerezy mechanicznej (naprężenie (σ) – odkształcenie (ϵ)) dla ścięgien wieprzowych dla pierwszego, piątego i dziesiątego cyklu obciążenia-odciążenia i trzech poziomów obciążenia.
FIG. 1. Mechanical hysteresis loops (stress (σ) – strain (ϵ)) for porcine tendons for the first, fifth and tenth cycle of the loading-unloading and three load levels.

The value of Young's modulus for tested porcine tendons was 256 ± 47 MPa, the value of ultimate tensile strength was $16,1 \pm 2,2$ MPa.

In FIG. 1 mechanical hysteresis loops for porcine tendons for three levels of load were shown. For all load levels, the area of hysteresis loop in the first loading-unloading cycle is significantly larger, but decays quickly after this cycle and between fifth and tenth cycle becomes nearly steady, what corresponds to the preconditioned state of the tendon. The values of dissipated energy were the highest in the first cycle of loading-unloading for all levels of load (FIG. 2). This means that, in the first cycle low value of the energy stored during stretching was returned after the tensile load was removed. Between fifth and tenth cycle of the loading-unloading, the stabilization of value of energy dissipation was observed. The mean values of energy dissipation for recorded cycles were 4.4 ± 0.7 mJ, 19.7 ± 3.7 mJ, 23.9 ± 3.9 mJ for load levels 50, 100 and 150 N respectively. The values of dissipated energy in the fifth cycle were lower by approximately 72, 74 and 77% for load levels 50, 100 and 150 N respectively in comparison to the first cycle. These values in the tenth cycle were lower by approximately 77, 80 and 82% for load levels 50, 100 and 150 N, respectively in comparison to the first cycle. In the case of the values of returned energy during unloading of tendons, the differences between individual cycles were less significant (FIG. 3). The differences of the returned energy values between first and fifth cycle were approximately 17, 11 and 7% for load levels 50, 100 and 150 N, respectively. Between fifth and tenth cycle of the loading-unloading, most of the energy stored during stretching was returned after the tensile load was removed. The influence of the applied loads on the values of both the energy of dissipation and the returned energy can be seen. For the values of mechanical hysteresis, this kind of dependency was not found (FIG. 4). The highest values of mechanical hysteresis were observed in first cycles for all load levels. The stabilization of the value of the mechanical hysteresis was observed between fifth and tenth cycles, its values were between 22 and 32%, respectively, what was about half of the hysteresis value for the first cycle.



RYS. 2. Energia dyssypacji dla ścięgien w pierwszym, piątym i dziesiątym cyklu obciążenia-odciążenia dla trzech poziomów obciążenia.
FIG. 2. The energy of dissipation for tendons in the first, fifth and tenth cycle of the loading-unloading for three levels of load.



RYS. 3. Energia zwrócona dla ścięgien w pierwszym, piątym i dziesiątym cyklu obciążenie-odciążenie dla trzech poziomów obciążenia.

FIG. 3. The returned energy for tendons in the first, fifth and tenth cycle of the loading-unloading for three levels of load.

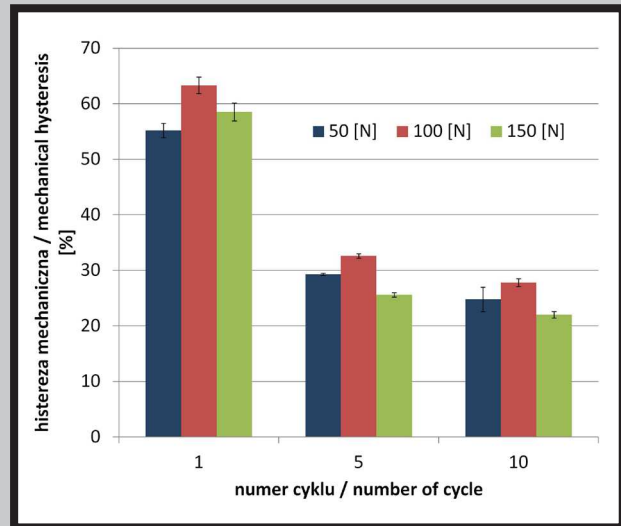
Najwyższa wartość wartości histerezy mechanicznej występowała w pierwszym cyklu dla wszystkich poziomów obciążenia. Pomiędzy piątym i dziesiątym cyklem nastąpiła stabilizacja wartości histerezy mechanicznej, jej wartości wyniosły odpowiednio od 22 do 32%, co stanowiło około połowę wartości histerezy dla pierwszego cyklu.

Natychmiast po pierwszym cyklu obciążenia wystąpiło trwałe odkształcenie. Odkształcenie resztkowe po pierwszym cyklu testu wyniosło 0.027/0.077/0.094 dla poziomów obciążenia odpowiednio 50, 100 i 150 N (RYS. 5). Po cyklu dziesiątym, jego wartość wyniosła 0.035/0.097/0.106 dla poziomów obciążenia odpowiednio 50, 100 i 150 N. Wzrost wartości odkształcenia resztkowego wynika z lepkością ścięgien.

Uzyskane wartości histerezy mechanicznej w piątym i dziesiątym cyklu pokrywają się z wartościami histerezy dla ścięgien ludzkich podanymi przez Maganaris i wsp. [2] w zakresie od 3 do 38% dla testu rozciągania *in vitro* oraz pomiędzy 5 i 25% dla testów *in vivo*. Na podstawie przeglądu literatury, Finni i wsp. [3] podali wartości histerezy mechanicznej dla wybranych ścięgien zwierzęcych pomiędzy 5 i 19% oraz pomiędzy 5 i 40% dla ścięgien ludzkich w warunkach *in vivo*. W badaniach przeprowadzonych dla ścięgien świni przez Shadwicka [7], wartość histerezy mechanicznej była pomiędzy 17,5 i 24,5%. Dla ścięgien szczura, średnia wartość histerezy była na poziomie 14,4% [8]. Zarówno dla ścięgien świni jak i szczura, wartości te były niższe niż uzyskane w tym opracowaniu. Różnice w prezentowanych wartościach histerezy mechanicznej są stosunkowo duże, co wynika z kilku czynników. Największe znaczenie mają różnice metodologiczne pomiędzy badaniami (mocowanie ścięgien, przekrój poprzeczny), anatomiczne miejsce pobrania, starzenie, aktywność fizyczna lub jej brak [4].

RYS. 5. Odkształcenie w funkcji czasu dla ścięgien w pierwszym, piątym i dziesiątym cyklu obciążenie-odciążenie dla trzech poziomów obciążenia.

FIG. 5. Strain versus time for porcine tendons in the first, fifth and tenth cycle of the loading-unloading for three levels of load.

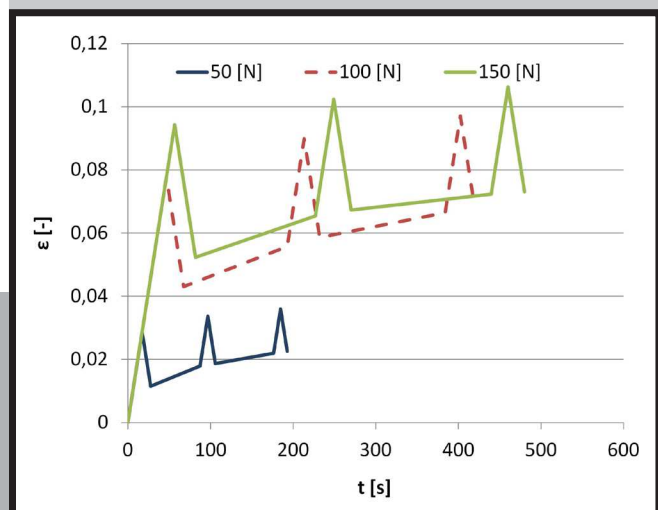


RYS. 4. Histereza mechaniczna dla ścięgien w pierwszym, piątym i dziesiątym cyklu obciążenie-odciążenie dla trzech poziomów obciążenia.

FIG. 4. The mechanical hysteresis for tendons in the first, fifth and tenth cycle of the loading-unloading for three levels of load.

A permanent strain occurred immediately after the first loading cycle. The residual strain after first cycle of test was 0.027/0.077/0.094 for the load levels 50, 100 and 150 N, respectively (FIG. 5). After the tenth cycle it was 0.035/0.097/0.106 for the load levels 50, 100 and 150 N, respectively. The increase in the value of residual strain results from the viscoelastic nature of tendons.

Obtained values of mechanical hysteresis in fifth and tenth cycle are in agreement with hysteresis values given by Maganaris et al. [2] for isolated human tendons in the range between 3 and 38% in tensile testing *in vitro* and between 5 and 25% in testes *in vivo*. Finni et al. [3] based on literature review, reported that the hysteresis values were between 5 and 19% for selected animals tendons and between 5 and 40% for human tendons tested *in vivo*. The investigation conducted on pig's tendons by Shadwick [7] showed the value of the mechanical hysteresis between 17.5 and 24.5%. For rat tendons the mean value of hysteresis was 14.4% [8]. Both for pig and rat tendons, these values were lower than presented in this study. The differences in reported mechanical hysteresis values are quite large due to many factors. The most significant factors are inter study methodological differences (tendon gripping, cross-sectional area), anatomical site, ageing, disuse or physical activity [4].



Badania histerezy mechanicznej ścięgien wieprzowych pokazały, że cykliczne obciążenie ścięgien powoduje pochłanianie energii przez nie oraz niezależność wartości histerezy od wartości zastosowanego obciążenia. Histereza mechaniczna badanych ścięgien była pomiędzy 22 i 32%, co jest zgodne z niektórymi wynikami badań dla ścięgien ludzkich [3-4]. Relatywnie niska wartość histerezy mechanicznej oznacza, że większość energii sprężystej, która jest pochłonięta podczas rozciągania zostaje zwrócona zaraz po usunięciu obciążenia. Mechanizm zwracania energii w ścięgnach pozwala na zaoszczędzenie energii metabolicznej podczas ruchu [9].

Badania histerezy mechanicznej dają możliwość lepszego zrozumienia biomechaniki ścięgien oraz dostarczają danych do modelowania i przewidywania zachowania ścięgien w warunkach obciążenia cyklicznego.

Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach działalności statutowej M-1/6/2016/DS.

Conclusions

The investigation of mechanical hysteresis of porcine tendons showed that the cyclic loading of the tendons resulted in elastic energy storage and the value of hysteresis independence of the value of applied load on tendons. Tested porcine tendons exhibited mechanical hysteresis between 22 and 32%, what is with good agreement with some results taken from the literature for human tendons [3-4]. Relatively low value of mechanical hysteresis means that most of the elastic energy stored during stretching is returned once after the tensile load is removed. Mechanism of energy provision in tendons allows to save metabolic energy during locomotion [9].

Mechanical hysteresis experiments give the possibility of a better understanding of tendons biomechanics and provide data for modeling and predicting the tendons behavior under the cyclic loading conditions.

Acknowledgement

The work was realized due to statutory activities M-1/6/2016/DS.

Piśmiennictwo

- [1] Cheng M., Chen W., Weerasooriya T.: Mechanical behavior of bovine tendon with stress-softening and loading-rate effects. *Advances in Theoretical and Applied Mechanics* 2(2) (2009) 59-74.
- [2] Maganaris C.N., Narici M.V., Almekinders L.C., Maffulli N.: *Biomechanics of the Achilles Tendon*, Springer (2007) 17-24.
- [3] Finni T., Peltonen J., Stenroth L., Cronin N.J.: Viewpoint: On the hysteresis in the human Achilles tendon. *Journal of Applied Physiology* 114 (2003) 515-517.
- [4] Maganaris C.N., Paul J.P.: Hysteresis measurements in intact human tendon. *Journal of Biomechanics* 33 (2000) 1723-1727.
- [5] Foure A., Nordez A., Cornu C.: Plyometric training effects on Achilles tendon stiffness and dissipative properties. *Journal of Applied Physiology* 109 (2010) 849-854.

References

- [6] Janjic N., Ninkovic S., Harhaji V., Stankovic M., Savic D., Milanov M.: Biomechanical properties of porcine tendon, ICET-2013, paper no. T.1-1.9, 1-4.
- [7] Shadwick R.E.: Elastic energy storage in tendons: mechanical differences related to function and age. *Journal of Applied Physiology* 68(3) (1990) 1033-1040.
- [8] Eliasson P., Fahlgren A., Pasternak B., Aspenberg P.: Unloaded rat Achilles tendons continue to grow, but lose viscoelasticity. *Journal of Applied Physiology* 103 (2007) 459-463.
- [9] Maffulli N., Renstrom P., Leadbetter W.B.: *Tendon Injuries*. Basic Science and Clinical Medicine, Springer (2005) 14-21.