



EXPERIMENTAL MODELLING OF RHEOLOGICAL BEHAVIOUR OF TENDON EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ŠLACH

Jitka JÍROVÁ, Vratislav KAFKA

Our paper deals with investigation of the stress-strain diagram and relaxation curve and of the influence of the rate of deformation on the stress-strain diagram for the human tendon of the musculus flexor hallucis longus. The material for experimental studies was obtained from cadavers. The characteristic feature of soft tissues is a strong dependence of the instantaneous properties on the preceding deformation; sufficient "preconditioning" is necessary in order that the mechanical properties may become constant. Our experimental research was used for the theoretical model which describes mechanical properties of human tendon. The derived mathematical model which is based on mesoscopic approach gives very good approximation of the rheological mechanical behaviour of the tendon.

Úvod

Cílem experimentálního výzkumu bylo zjistit pracovní diagram a relaxační křivku šlachy. Data zjištěná experimentálně byla použita na sestavení matematického modelu. Z fyziologického hlediska šlacha přenáší síly ze svalů do kosti a tak zajišťuje pohyb kloubů. Měřená šlacha byla vypreparována z nohy a navazuje na musculus flexor hallucis longus.

Mechanické vlastnosti měkkých tkání závisí na jejich strukturálním uspořádání. To znamená, že závisí nejen na chemickém složení ale také na poměru a skladbě jednotlivých komponent. Kolagen a elastin jsou dva základní materiály, které tvoří strukturu měkkých tkání, v případě šlach je však zastoupení elastinu velmi nízké. Geometrické uspořádání svazků kolagenových vláken šlach je prakticky paralelní a odtud plyne značná pevnost šlach v porovnání s jinými měkkými tkáněmi [1]. Uvnitř svazku vláken jsou jednotlivá vlákna uspořádána vlnovkovitě a při zatížení se vlnovky napřimují, což se na makroskopické úrovni projeví nelineárním pracovním diagramem se vzrůstajícím tečným modulem.

Specifické rysy experimentálního výzkumu šlach

Typické rysy deformačních vlastností šlach je možno shrnout do pěti bodů :

- 1) růst hodnoty modulu pružnosti v průběhu natahování šlachy;
- 2) výrazné dotvarování při konstantním zatížení a relaxace při konstantním prodloužení;
- 3) závislost vztahu mezi napětím a přetvořením na rychlosti zatěžování;
- 4) narovnání kolagenových vláken v průběhu zatěžování tahem;

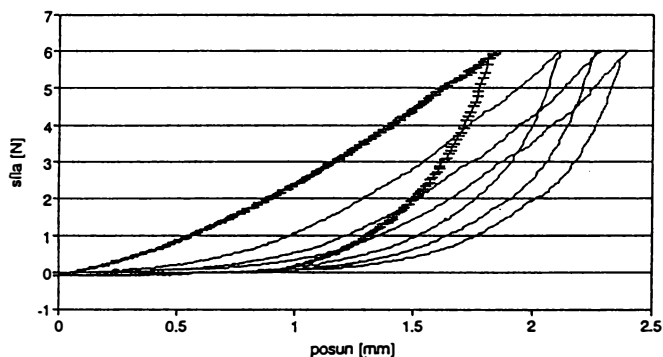
- 5) závislost okamžitých vlastností na předcházejícím zatěžování; při vhodném "předtrénování" se stává průběh cyklu zatížení a odlehčení konstantní.

Experimentální výzkum šlach

Sval, šlacha a ostatní měkké tkáně jsou vazkopružné materiály s výrazně nelineárním chováním. Po prvním protažení a odlehčení šlachy vznikne největší ireversibilní deformace, která se při dalších zatěžovacích cyklech postupně zmenšuje (obr. 1). V průběhu zatěžování a odlehčování je možno pozorovat významnou hysterezi

Graf závislosti : síla - posun

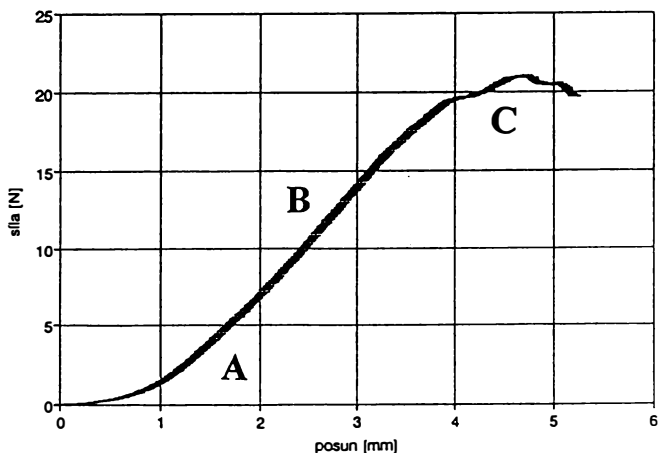
I.-IV.zatěžovací cyklus



Obr. 1

Typická křivka zatížení - prodloužení se skládá ze tří částí (obr.2):

- A) exponenciální (fyziologický rozsah, ve kterém sval obvykle pracuje),
- B) téměř lineární (část, ze které se uvažuje Youngův modul),
- C) nelineární - končí porušením.



Obr.2

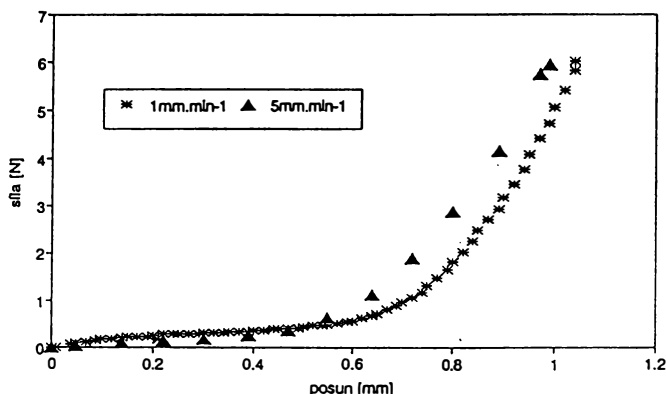
Odlehčovací křivky jsou vůči sobě rovnoběžně posunuté a po několika desítkách cyklů se značně přiblíží. Z uvedeného plyne značná závislost diagramu síla-posun na historii zatěžování.

Na základě specifických vlastností měkkých tkání bylo nutno vypracovat experimentální metodu, abychom získali reprodukovatelné výsledky pro relaxační křivku napětí. Kromě již výše uvedených vlastností je nutno si uvědomit, že ve šlachách je voda vázaná v molekulách kolagenu. Proto bylo nutné zajistit při dlouhodobých zkouškách dostatečně vlhké prostředí, neboť při jejím výrazném úbytku by jistě došlo i ke změně mechanických vlastností.

Materiál pro experimentální výzkum byl získán na patologii. Ihned po odebrání byly šlachy zabaleny do roušky navlhčené ve fyziologickém roztoku a zmrazeny na teplotu -25°C . Před experimentem byly pak jednotlivé šlachy rozmrazeny na pokojovou teplotu $+23^{\circ}\text{C}$. Během experimentu byl vzduch kolem měřeného vzorku zvlhčován odpařováním vody z misek umístěných v bezprostřední blízkosti šlachy. Pro zatěžování byl použit zkušební stroj Instron 4301, u kterého byl maximální měřicí rozsah síly nastaven na 50 N. Měřená délka šlachy $l=50\text{mm}$ a průřez $A=7,85\text{mm}^2$.

Měřicí metoda byla založena na nutnosti "předtrénování" šlachy, dříve než jsme mohli provést vlastní měření, což spočívalo v následujícím postupu. Šlacha byla zatěžována rychlostí $0,5\text{mm/min}$, a to postupně ve dvou krocích až do zatížení 7 N, které je v rozsahu pružné oblasti. Při prvním kroku byl vzorek zatížen do 3 N a zatěžovací stroj byl zastaven na dobu 30 minut. Aniž jsme měřený vzorek odlehčili, zvětšili jsme po 30 min. zatěžovací sílu na 7 N a opět jsme nechali relaxovat napětí. Po 30 minutách byl vzorek odlehčen a ve dvou cyklech jsme změřili diagram síla-posun. Oba cykly byly téměř totožné, šlacha měla již ustálené mechanické vlastnosti. Říkáme, že vzorek byl "předtrénován". Při opakovaném cyklu se neobjeví žádná změna do té doby, dokud nezměníme režim zatěžování. Pak jsme mohli přistoupit k určení relaxační křivky (obr.4) a vlivu rychlosti zatěžování. Na obr.3 je znázorněn vztah síla-posun pro dvě rychlosti.

Závislost síla-posun na rychlosti



Obr.3

Matematický model

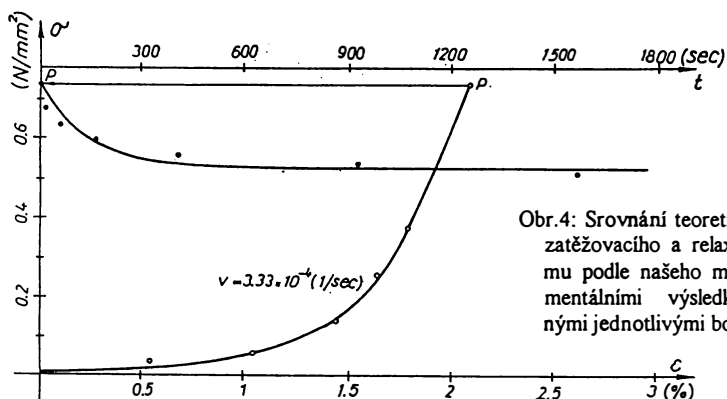
Matematický popis mechanického chování šlach má obvykle fenomenologický charakter (viz např./2/), nebo charakter mikromechanický, ve kterém autoři popisují jednotlivá různě orientovaná vlákna a změny jejich orientace v důsledku zatěžování (např./3/). Náš přístup - který je možno označit jako mezomechanický - vychází z obecné koncepce modelování heterogenních látek uveřejněné v monografii /4/. Nepopisují se zde jednotlivé mikroskopické objekty, struktura je charakterizována nezápornými "strukturálními parametry", jejichž variace umožňuje přechod k homogennímu poli deformace. Právě tato možnost je důležitá pro popis šlach, kde změna strukturálního parametru charakterizujícího strukturu kolagenových vláken umožňuje popis přechodu k homogenní deformaci ve směru zatěžování v důsledku

napřimování vláken. Šlacha se popisuje jako objekt transversně-izotropní a její model je prvním modelem vytvořeným na základě citované monografie, ve kterém se uvažuje s proměnou strukturálních parametrů.

Při formulování zákonitosti proměny strukturálního parametru příslušného vláknům jsme vycházeli z toho, že proces napřimování vláken je optimalizován - podobně jako u jiných biologických struktur. Pro svaly, které jsou šlachami spojeny se skeletálním systémem, je optimální podávat konstantní výkon. Naproti tomu typickou situací skeletálního systému je, že je zatěžován silou lineárně vzrůstající s časem. Zákonitost proměny příslušného strukturálního parametru (a tedy zákonitost napřimování kolagenových vláken) jsme tedy zformulovali tak, aby šlacha zprostředkovala takové spojení svalu se skeletálním systémem, že lineární vzrůst síly působící na skeletální systém vyžaduje konstantní výkon svalu.

Závěr

Měření modulu pružnosti šlach, která jsou uváděna v literatuře, mají značně široký rozptyl. Rozdílnost Youngova modulu je pravděpodobně způsobena různými podmínkami měření. Při snaze odvodit konstitutivní rovnici šlachy jsme se proto rozhodli experimentálně změnit potřebné konstanty v naší biomechanické laboratoři. Na obr.4 je ukázáno, že odvozený matematický model skutečně velmi dobře popisuje experimentálně zjištěné mechanické chování šlachy.



Obr.4: Srovnání teoretických průběhů zatěžovacího a relaxačního diagramu podle našeho modelu s experimentálními výsledky (znázorněnými jednotlivými body)

LITERATURA

1. Viidik A.: Properties of tendon and ligaments, In: Handbook of Bioengineering (R.Skalak and S.Chien), Mc Graw-Hill Book Company, 1987
2. Fung Y.C.: Biomechanics - Mechanical properties of living tissues, Springer Verlag, New York - Heidelberg - Berlin, 1981
3. Ault H.K. and Hoffman A.H.: A composite micromechanical model for connective tissues, J.of Biomech.Engineering 114 (1992), 137-146
4. Kafka V.: Inelastic mesomechanics, World Scientific P.C., Singapore - New Jersey - HongKong, 1987

Ing. Jitka Jírová, CSc., Ing. Vratislav Kafka, DrSc.
Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR,
128 49 Praha 2, Vyšehradská 49, tel.297103, fax.295903