



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO URČOVÁNÍ SMĚRU VÝZTUŽNÝCH VLÁKEN V MĚKKÝCH BIOLOGICKÝCH TKÁNÍCH V DEFORMOVANÉM STAVU

DESIGN OF APPARATUS FOR DETERMINATION OF DIRECTIONS OF
REINFORCING FIBRES IN SOFT BIOLOGICAL TISSUES IN THEIR
DEFORMED STATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Sodomka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Burša, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Tomáš Sodomka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jiří Burša, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh přípravku pro určování směru výztužných vláken v měkkých biologických tkáních v deformovaném stavu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měkké biologické tkáně představují složité kompozitní materiály, vyztužené obvykle různě orientovanými kolagenními vlákny, která při velkých deformacích tkáně mění podstatně svou orientaci. Jejich směry se určují histologickou analýzou pod mikroskopem, ale chybí informace o jejich orientaci v deformovaném stavu. Hlavní náplní práce je návrh přípravku, který by umožnil zafixovat planární vzorek měkké tkáně formaldehydem při definovaném deformačním zatížení, aby bylo možno histologicky vyhodnotit změnu směrů vláken se zatížením.

Cíle bakalářské práce:

Na základě literatury se seznamte se strukturou a vlastnostmi měkkých tkání lidského těla (stěny dutých orgánů, kůže apod.) a vytipujte tkáně s významnou mechanickou úlohou kolagenních vláken. Navrhněte přípravek umožňující řízenou dvuosou deformaci planárního vzorku měkké tkáně ve fyziologickém rozsahu zatížení a jeho ponoření do formaldehydu, který tuto deformaci tkáně zafixuje. Nakreslete a v rámci možností ověřte výkresovou dokumentaci navrženého přípravku.

Seznam doporučené literatury:

JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., BURŠA, J.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost I. Cerm Brno, 2004.

ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., JANÍČEK P., BURŠA, J.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost II. Cerm Brno, 2006.

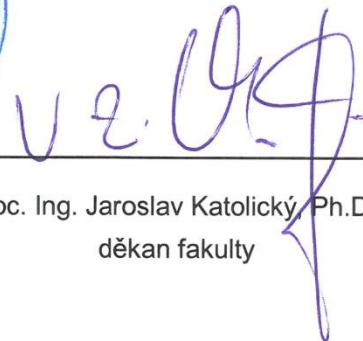
FUNG, Y. C.: Biomechanics. Mechanical properties of living tissues. Springer, 1993.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 25. 10. 2017



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá určováním směrů kolagenních vláken v elastických arteriích.

Prvním cílem je obecné seznámení s problematikou měkkých tkání se zaměřením na pojivovou tkáň, jejíž neodmyslitelnou složkou jsou kolagenní vlákna. Dále seznamuje s uspořádáním kolagenních vláken, jejich vlnitostí a jak vlnitost znemožňuje určit jejich směr.

Druhým cílem této práce je návrh a v rámci možností test mechanického přípravku, který umožňuje natahovat čtvercový vzorek aorty do dvou na sebe kolmých směrů nezávisle na sobě až do relativního prodloužení 30 %.

Přípravek je realizován tak, že natažený vzorek může být v deformovaném stavu ponořen do roztoku formaldehydu, který zajistí fixaci deformace.

Následné histologické řezy vzorku poslouží pro určování globálních směrů kolagenních vláken v aortě.

Přípravek natažením simuluje podmínky lidského či zvířecího těla, kde je aorta axiálně předepnutá a zároveň tlakem krve roztažena v radiálním směru.

ABSTRACT

The Bachelor's thesis is focused on the determination of directions of collagen fibres in elastic arteries.

The first aim of this thesis is a general introduction into soft tissue mechanics with turning attention to connective tissue where collagen fibres are their inseparable part. Also the thesis introduces arrangement of collagen fibres, their waviness and how the waviness thwarts determination of direction of fibres.

The second aim is a design and test of the mechanical apparatus, which is able to stretch a squared aortic sample in two perpendicular directions (independently on each other) up to the relative deformation of 30 %.

Design of the apparatus allows the sample to be dipped into the formaldehyde solution, which fixes the deformation.

Consequent histologic sections of the sample will be used for the determination of global directions of collagen fibres in the aorta.

The apparatus is designed to simulate conditions in a human or animal body where aorta is axially pre-stretched and at the same time expanded in the radial direction by blood pressure.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aorta, kolagen, kolagenní vlákna, vlnitost, pojivová tkáň, globální směr, deformace, přípravek, dvouosá deformace

KEYWORDS

Aorta, collagen fibres, waviness, connective tissue, global direction, deformation, mechanical apparatus, biaxial strain

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SODOMKA, T. *Návrh přípravku pro určování směru výstužných vláken v měkkých biologických tkáních v deformovaném stavu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 56 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing Jiří Burša, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh přípravku pro určování směru výstužných vláken v měkkých biologických tkáních v deformovaném stavu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22. května 2018

.....
Tomáš Sodomka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Jiřímu Buršovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a za zajištění výroby přípravku.

Dále děkuji rodině a přátelům za podporu a – hlavně v pozdějších fázích vypracovávání – za zvládání mých ne vždy příjemných nálad.

Rovněž děkuji zaměstnancům Ústavu strojírenské technologie VUT za výrobu přípravku.

OBSAH

ÚVOD	13
1 TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1 TKÁNĚ A JEJICH KLASIFIKACE.....	16
1.1.1 <i>Epitel</i>	16
1.1.2 <i>Pojivová tkáň</i>	16
1.1.3 <i>Svalová tkáň</i>	17
1.1.4 <i>Nervová tkáň</i>	17
1.2 POJIVOVÁ TKÁŇ.....	18
1.2.1 <i>Vazivová tkáň</i>	18
1.2.2 <i>Specializované PT</i>	18
1.2.3 <i>Vlákná PT</i>	19
1.3 KARDIOVASKULÁRNÍ SYSTÉM	21
1.3.1 <i>Elastické arterie</i>	21
1.4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI AORTY	22
1.5 URČOVÁNÍ SMĚRU KOLAGENNÍCH VLÁKEN	24
2 NÁVRH PŘÍPRAVKU	25
2.1 OBECNÉ INFORMACE	26
2.2 NÁVRH ŘEŠENÍ.....	27
2.3 PRINCIP FUNKCE	27
2.4 VÝPOČTOVÁ ČÁST	28
2.4.1 <i>Délka drážky pro pohyb čelistí</i>	28
2.4.2 <i>Namáhání pohybového šroubu</i>	28
2.4.3 <i>Namáhání háčku</i>	29
2.5 POPIS JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT	32
2.5.1 <i>Vyráběné součásti</i>	32
2.5.2 <i>Kupované součásti</i>	34
2.6 VÝBĚR MATERIÁLU.....	35
2.6.1 <i>Vyráběné součásti</i>	35
2.6.2 <i>Kupované součásti</i>	35
2.7 VOLBA TOLERANCÍ A DRSNOSTÍ.....	37
2.7.1 <i>Rozměrové tolerance</i>	37
2.7.2 <i>Geometrické tolerance</i>	37
2.7.3 <i>Drsnost povrchu</i>	37

2.8	MONTÁŽNÍ POSTUP	38
2.8.1	<i>Úchyt háčků</i>	38
2.8.2	<i>Natahovací část přípravku</i>	39
2.8.3	<i>Kompletní přípravek</i>	40
2.9	ÚPRAVY PŘÍPRAVKU	41
2.10	MAZÁNÍ	41
2.11	BALENÍ A SKLADOVÁNÍ	41
2.12	DALŠÍ VARIANTY KONSTRUKCE	42
2.12.1	<i>Varianta č. 1</i>	42
2.12.2	<i>Varianta č. 2</i>	42
2.12.3	<i>Varianta č. 3</i>	43
3	VÝSLEDKOVÁ ČÁST	45
3.1	POPIS TESTU	46
3.2	NAMĚŘENÁ DATA	47
3.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	49
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
	SEZNAM PŘÍLOH	56

ÚVOD

Klystýr a aspirin, podle doktora Grünsteina z Haškova Švejka nejlepší léčebné prostředky hned po chininu a výplachu žaludku. Avšak najdou se i případy, kde tyto metody selhávají. Jedním z nich je i arteriální aneurysma. V léčbě selhává i „klystýr, ale pořádný, až pacient volá všechny svaté, aby se to aneurysma leklo a vyběhlo.“

Ale teď zase vážně. Nemoci kardiovaskulárního systému jsou co do pořadí nečastější příčinou úmrtí v České republice. [1] Můžeme si hodit korunou a šance, že nás postihne něco takového, je podobná tomu, že padne orel.

Mezi nemoci oběhové soustavy se řadí i zmíněné arteriální aneurysma. Jde o výduť – lokální zvětšení průřezu tepny, která se postupem času zvětší až do té míry, že stěna tepny vlivem vysokého tlaku krve může prasknout. Pokud je člověku výduť diagnostikována, je i přesto těžké předpovědět dobu do prasknutí a akutnost léčby mj. proto, že není známa přesná struktura cévní stěny. [2]

Hlavní a nejpevnější složkou cévní stěny jsou kolagenní vlákna. Tato vlákna jsou v nezatíženém stavu zvlněná. O tom, jakým směrem míří v živém organismu, kde jsou tepny předepnuty a tlakem krve roztaženy (čímž se vlnitost zmenšuje) chybí informace. A právě vlnitost při současných vyhodnocovacích metodách brání určení směru vláken z nezatíženého stavu. [3]

Na následujících stranách je snaha se podrobněji seznámit se strukturou pojivových tkání, konkrétně stavbou elastických arterií a poté se pokusit navrhnout přípravek, který bude mít za úkol na výseku tepny natažením simulovat deformační podmínky v lidském či zvířecím těle a pomoci tak určit směr kolagenních vláken, protože jejich směr určuje maximální pevnost cévní stěny a některé další vlastnosti.

Se znalostí těchto směrů by mohly být zlepšeny výpočtové modely a případně i zefektivněna léčba tohoto i dalších onemocnění.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Tkáně a jejich klasifikace

Přestože se často jako základní jednotka těla považuje buňka, lze rovněž říci, že za udržování tělesných funkcí jsou zodpovědné tkáně. Při zkoumání struktury lidského či zvířecího těla se totiž dají pozorovat pole buněk, které si jsou podobné svou stavbou a funkcí. Tato pole se nazývají tkáně a plní svou funkci skrze podobné chování jednotlivých buněk. Koncepce rozdělení shluků buněk na tkáně poskytuje základ pro porozumění a rozpoznání mnoha buněčných typů zahrnutých v těle a říká, jak jsou spolu navzájem propojeny. I přes různorodost tělních orgánů, fyziologických vlastností, podoby a strukturální organizaci lze buněčná uskupení zredukovat na čtyři základní skupiny [4]:

- Epitel
- Pojivová tkáň
- Svalová tkáň
- Nervová tkáň

Pro rozpoznávání jednotlivých typů existují dvě základní definice: Dělení na základě morfologie (stavby) tkáně – takto se rozlišuje epitelu od pojivových tkání; a funkční hledisko – pro svalové a nervové tkáně. [4]

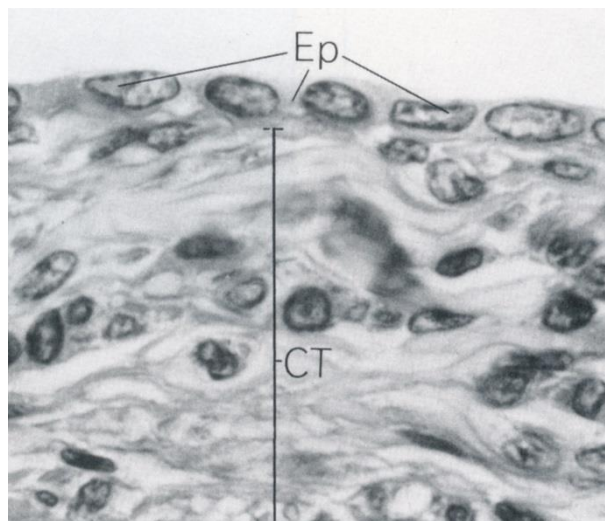
1.1.1 Epitel

Epitelová tkáň charakteristická svou blízkostí k volnému povrchu orgánu, to jest k linii obklopující vnější povrch orgánů formující krytí, lemující tělní dutiny a podobně. Tvoří ji jednotlivé buňky, které leží v souvislé vrstvě blízko sebe, čímž zbývá málo prostoru pro mezibuněčný materiál a oproti pojivovým tkáním není tak zřetelný přechod mezi jednotlivými buňkami. [4]

1.1.2 Pojivová tkáň

U pojivové tkáně jsou jednotlivé buňky uloženy znatelně dále od sebe a prostor mezi nimi zaujímá mezibuněčná matrice. Rozdíl mezi epitelem a pojivovou tkání je zobrazen na Obr. 1. [4]

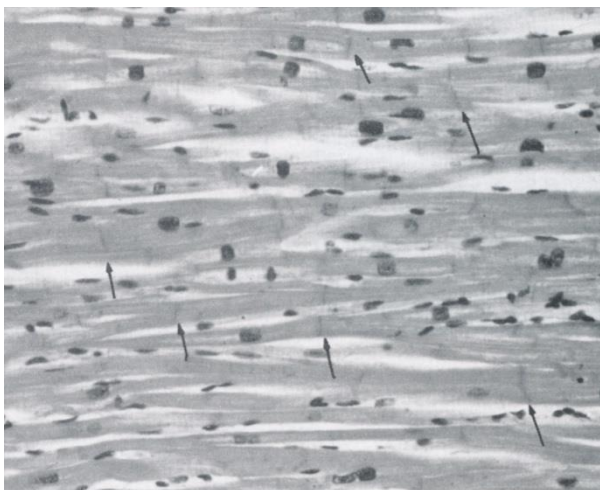
Pojivová tkáň je tvořena výstužnými vlákny na něž je tato práce zaměřena, proto je níže uvedena ještě její podrobnější charakteristika na rozdíl od ostatních typů. [4]



Obr. 1 Srovnání epitelu (Ep) a pojivové tkáně (CT) [4]

1.1.3 Svalová tkáň

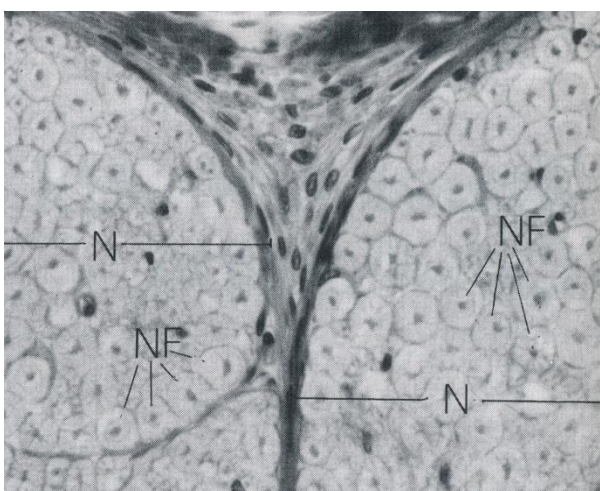
Svalová tkáň je význačná svou funkcí se stahovat díky proteinům *aktin* a *myosin*. Svalové buňky jsou sdružené ve stejně orientovaná svalová vlákna tvořící svazky – svaly. Svalová tkáň se dále dělí na příčně pruhovanou, hladkou a srdeční (Obr. 2). [4]



Obr. 2 Srdeční svalová tkáň [4]

1.1.4 Nervová tkáň

Nervy se skládají z nervových buněk – neuronů a přidružených podpůrných buněk. Přestože u všech buněk v těle jsou pozorovatelné reakce na elektrické podněty, neurony jsou zaměřené na přenos elektrického náboje z jedné části nervové sítě v těle do jiné. Tato funkce se odráží i na tvaru buňky. Na Obr. 3 je k vidění příčný řez nervovou tkání. Lze si na něm všimnout svazků (N) nervových vláken (NF). Jednotlivá vlákna jsou tvořena z axonu uprostřed – částí buňky přenášející elektrický impuls a obalu – tzv. myelinové pochvy, která slouží jako izolant a brání vytrácení elektrického náboje¹. [4]



Obr. 3 Řez nervovou tkání [4]

¹ Nemoc, při které tělo rozrušuje myelinové pochvy a nervový systém ztrácí svou funkci, se nazývá Roztroušená skleróza.

1.2 Pojivová tkáň

Pojmem pojivová tkáň (dále jen PT) je označována široká skupina tkání s mnoha funkcemi – ať už v tradičním pojetí nebo podskupina úzce zaměřených tkání se specializovanými funkcemi. [4]

1.2.1 Vazivová tkáň

Vazivo se vyvinulo z mesenchymu, což je zárodečná tkáň PT a svalstva. Tato tkáň prostupuje celé tělo a na periférii je ohraničena vrstvou *basal lamina* – tenká, viditelná pouze pod elektronovým mikroskopem, vláknitá vrstva ohraničující přechod k epitelu. [5] Slouží jako podpůrná struktura pro přes ni ležící epitel – podpora je jak mechanická, tak dále spočívá i v tom, že zde leží krevní řečiště a nervy pro potřeby epitelu. [4]

Vazivová tkáň se dělí na Husté a Řídké vazivo. Husté má svazky vláken uspořádané paralelně a je stavěno pro snášení jednoosé napjatosti, zatímco u Řídkého vaziva jsou vlákna propletena bez pravidelné orientace. [4]

1.2.2 Specializované PT

Specializované PT se až na výjimky rovněž vyvinuly z mesenchymu. Typ rozvoje se odráží na funkci, kterou PT plní – ve vazech, šlachách a chrupkách převládají výstužná vlákna, zatímco u kostí a některých chrupavek jednotlivé složky zmineralizovaly. Dalším příkladem jsou lymfatické tkáně, které jsou uzpůsobeny tomu, aby se účastnily imunitní odpovědi na zánět, nebo tuková tkáň, která má funkci ochrannou a zároveň je zásobárnou energie. Jednou ze specializovaných PT je i krev. [4]

Pro úplnost je rozdělení znázorněno ještě níže: [4]

Vazivová tkáň

- Řídká
- Hustá

Specializovaná PT

- Tuhá pravidelná PT (vazy a šlachy)
- Tuková tkáň
- Krev
- Kostí
- Chrupavky
- Krevní tělíška (červené a bílé krvinky, krevní destičky)
- Lymfatická (mízní) tkáň

Zárodečná PT

- Mesenchym
- Želatinová sliznicovitá tkáň – přítomná hlavně v zárodečném stupni vývoje [6]

České překlady některých anglických názvů mohou mnohdy uvést čtenáře v omyl, pokud by chtěl například zařadit vazy mezi vazivovou tkáň (v orig. Connective tissue proper).

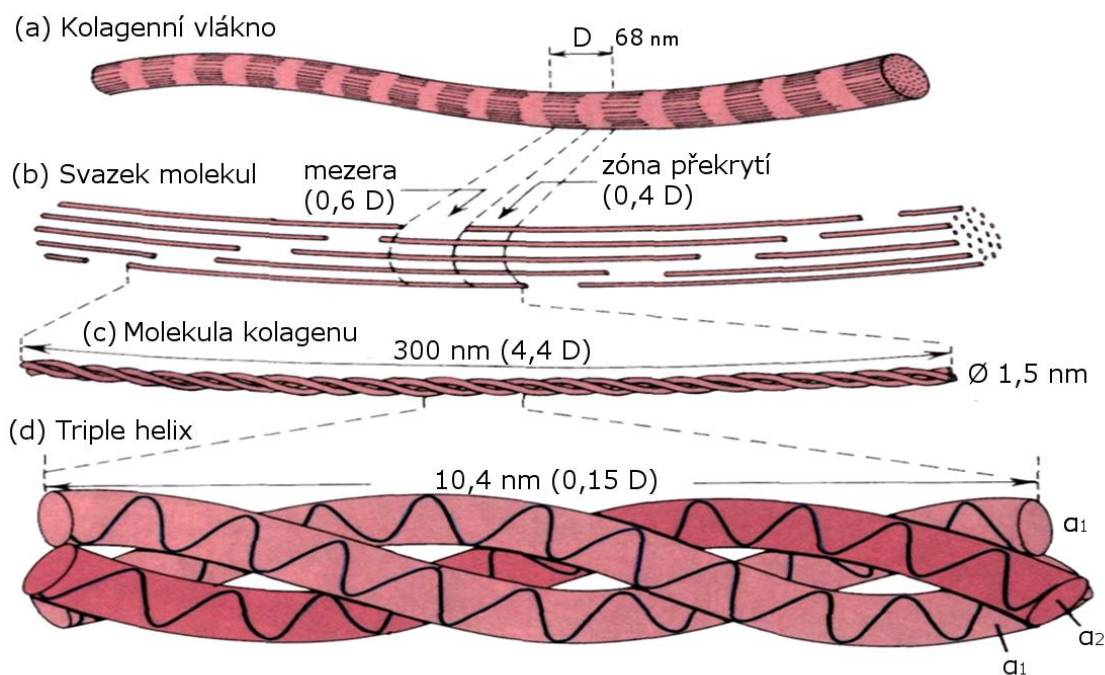
1.2.3 Vlákna PT

Existují tři typy vláken – kolagenní, retikulární a elastinová. [3]

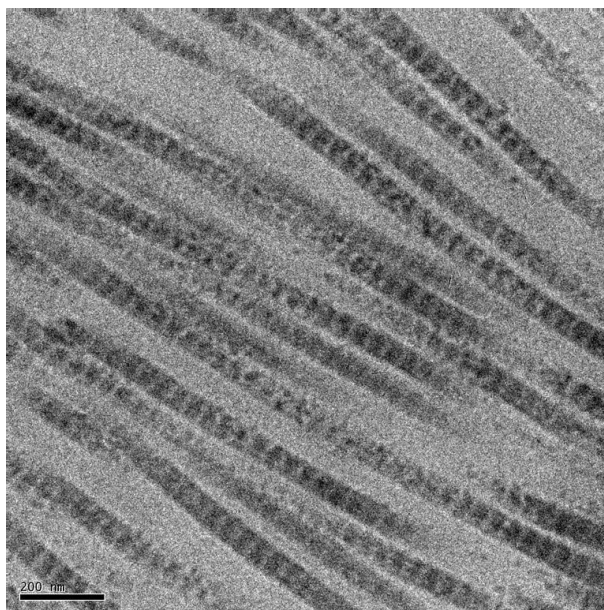
1.2.3.1 Kolagenní vlákna

Kolagenní vlákna jsou hlavní a nejhojnější vlákna PT, zároveň se také nejčastěji vyskytují v zubech a kostech. Mají vysokou tahovou pevnost a jsou flexibilní (k mechanickým vlastnostem jednotlivých typů viz níže). [4]

Při pozorování se jeví jako vlnová struktura různé šířky a neurčité délky (k vlnitosti vláken ještě dále). Na Obr. 4 je vyobrazen rozpad kolagenního vlákna na menší struktury. Vlákna vypadají jako řada příčných skupin opakujících se s periodou přibližně $D = 68 \text{ nm}$ podél délky vlákna (a), to je dáno rozložením molekul proteinu kolagenu (b), z čehož má každá molekula přibližně 300 nm na délku a $1,5 \text{ nm}$ v průměru (c). Uspořádání molekuly je ve tvaru trojšroubovice (tzv. *Triple helix*, (d)) a je tvořena hlavně aminokyselinami *glycin*, *prolin* a *hydroxyprolin* a *hydroxylysin*. [3], [4]



Obr. 4 Struktura kolagenního vlákna, [7] (upraveno)



Obr. 5 Kolagenní vlákna zobrazená elektronovým mikroskopem, tmavé pruhy na vláknech jsou zóny překrytí, [8]

1.2.3.2 Retikulární vlákna

Retikulární vlákna jsou příbuzná kolagenním, nicméně se neseskupují ve svazcích, ale jsou roztroušeny jednotlivě a tvoří síť v řidší matrici. Oproti kolagenním vláknům jsou ještě tenčí a mají průměr $\sim 20\text{ nm}$. [4]

V těle jsou k nalezení hlavně na hranicích PT s epitelem, okolí malých krevních řečišť, nervů a podobně. [4]

1.2.3.3 Elastinová vlákna

Tato vlákna jsou rovněž tenčí než kolagenní a jak název napovídá jejich hlavní vlastností je elasticita. Rozložení vláken je nahodilé. Vlákna se skládají z proteinu *elastinu* a *mikrofibril*, elastin má relativně amorfní vzhled. [4]

Jedním z hlavních výskytů elastinových vláken jsou elastické arterie, kde vlákna tvoří lamely umístěné v soustředných vrstvách ve stěnách řečiště. [4]

1.3 Kardiovaskulární systém

Kardiovaskulární systém se skládá z krevního řečiště, ve kterém proudí krev, srdce udržující krev v oběhu a lymfatického řečiště, kde koluje míza. Rozdílné druhy krevních řečišť jsou uspořádány tak, aby doručovaly rychle okysličenou krev do kapilár – nejmenšího tenkostěnného řečiště, kde probíhá odkysličování krve. [4]

Po těle krev koluje velkým krevním oběhem arteriemi, zpět do srdce je krev odváděna žilami, kde poté putuje do malého krevního oběhu – do plic a odtud okysličená zpět do srdce a velkého krevního oběhu. [3], [4]

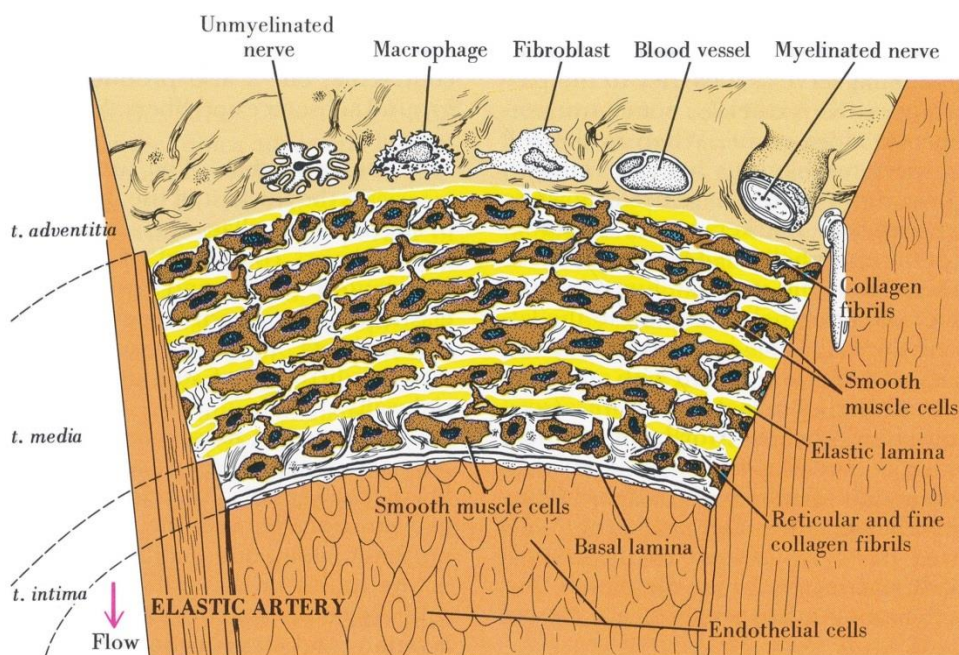
Arterií je několik druhů: velké – elastické arterie, střední – svalové arterie, malé arterie a arteriole (tepénky). Histologicky jsou navzájem rozlišované na základě tloušťky a rozdílů ve složení jednotlivých vrstev. Vrstvy arterií jsou tři *tunica intima*, *tunica media* a *tunica adventitia* (platí i pro žíly, pouze se liší v tloušťce a stavbě) [3], [4]

Pro tuto bakalářskou práci je důležitá pouze největší elastická arterie – aorta, protože je dostatečně velká na to, aby se z ní dal udělat vzorek vhodný k natažení. Je zde tedy rozebrán pouze jeden typ a ostatní jsou opomenuty.

1.3.1 Elastické arterie

Aorta, jak již bylo výše zmíněno, je největší elastickou arterií v těle, vychází ze srdce a stáčí se směrem k dolním končetinám (aortální oblouk). Elastické arterie slouží pouze jako potrubí pro krev a nedochází zde k odkysličování krve. Při systole srdečního cyklu se rozšiřují a při diastole zase smršťují. Přetlak krve se pohybuje 16/10 kPa při systole/diastole. [3]

V těle se vyskytují axiálně předepnuté, čímž se předchází riziku ztráty tvarové stability a následného přerušení průtoku krve při ohybu tepny. [3]



Obr. 6 Řez elastickou arterií [4]

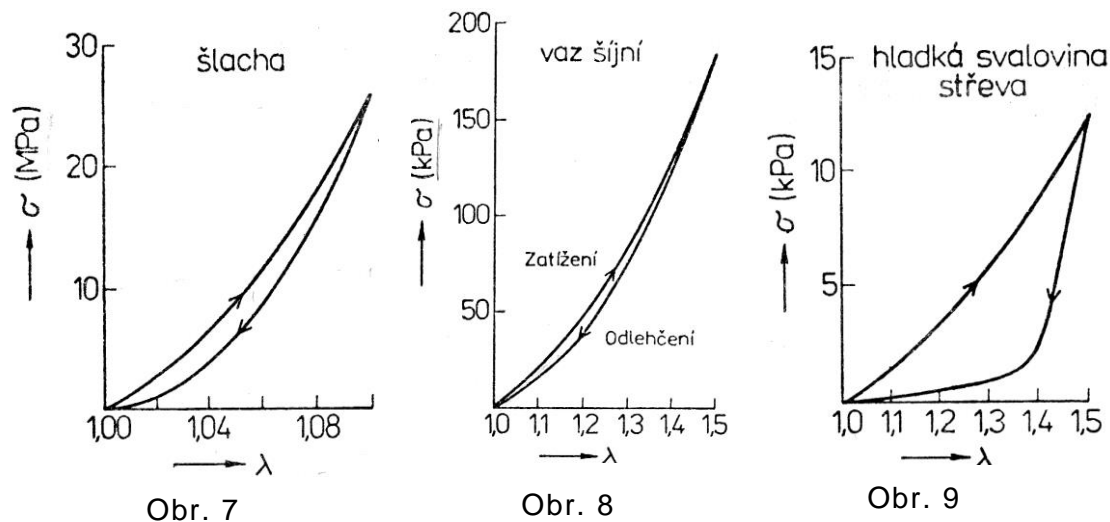
1.4 Mechanické vlastnosti aorty

Z Obr. 6 je zřejmé, že se aorta skládá hlavně z výstužných vláken elastinu, kolagenu a poté z hladkých svalových buněk. Přibližné procentuální zastoupení jednotlivých složek aorty psa v úseku mezi srdcem a aortálním obloukem je uvedeno Tab. 1 [3]

Tab. 1 Složení aorty psa [3]

	Kolagenní vl. [%]	Elastinová vl. [%]	Hladké svalstvo [%]
<i>Aorta ascendes</i>	16	48	35

Níže jsou na Obr. 7 – 9 vyobrazeny grafy ukazující průběh smluvního napětí v závislosti na relativním protažení λ ($\lambda = 1$ nezátížený vzorek) při jednoosém zatížení tkáně z kolagenu (Obr. 7), elastinu (Obr. 8) a hladké svaloviny (Obr. 9). [3]



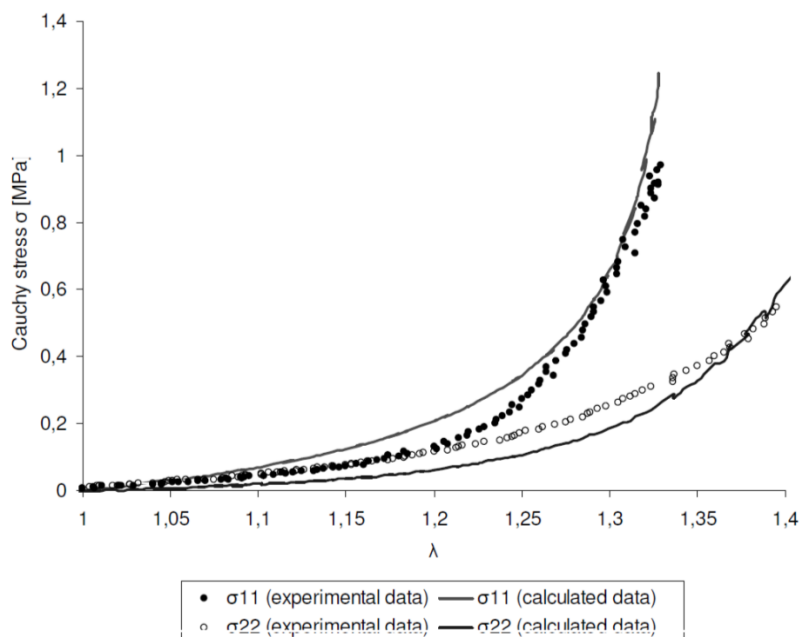
Tab. 2 Mechanické vlastnosti jednotlivých složek aorty [3]

	Kolagenní vl.	Elastinová vl.	Hladké svalstvo
E [kPa]	$10^5 - 2 \cdot 10^6$	200 – 400	15 – 25
A [%]	4 – 10	130	-
R_m [MPa]	90 – 130	-	-

- ... nedohledána data

Z Tab. 2 i Obr. 7 až 9 je zřejmé, že největší vliv na napětí a protažení tkáně mají kolagenní vlákna, protože mají mnohokrát větší Youngův modul pružnosti (vzhledem k tomu, že křivky v grafech nejsou lineární, je uvažován pouze sečný modul pružnosti).

Dále je potřeba říci, že tepna vykazuje anizotropní vlastnosti obvodového vůči axiálnímu směru. Na Obr. 10 je vyobrazen Graf závislosti Cauchyho napětí na poměrném protažení u dvousého zatěžování prasečí aorty. [9]



Obr. 10 Graf závislosti Cauchyho napětí na poměrném protažení [9]

V grafu se nachází modelem předpovězené a experimentálně změřené hodnoty Cauchyho napětí pro hlavní směry tenzoru přetvoření.

Cauchyho napětí σ ve směru i se na smluvní napětí σ_R přepočte na základě vztahu (1): [2]

$$\sigma_{Ri} = \frac{\sigma_i}{\lambda_i} \quad (1)$$

Z grafu byly vyčteny hodnoty maximálních napětí a protažení:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= 0,96 \text{ MPa} & \sigma_{22} &= 0,54 \text{ MPa} \\ \lambda_{11} &= 1,33 & \lambda_{22} &= 1,39 \end{aligned}$$

Tedy po dosazení do vztahu (1):

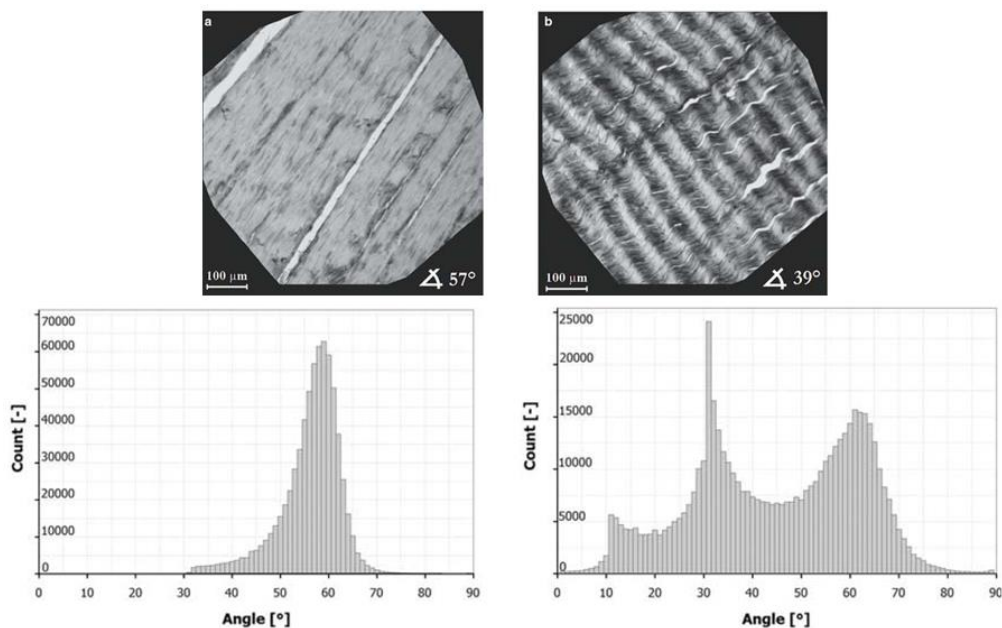
$$\sigma_{R11} = 0,72 \text{ MPa} \quad \sigma_{R22} = 0,39 \text{ MPa}$$

Tyto hodnoty byly určeny pro pozdější potřeby stanovení velikosti síly, kterou budou namáhány úchyty aorty na přípravku. Pro dimenzování úchyty byla použita vyšší z hodnot.

1.5 Určování směru kolagenních vláken

V nezatíženém stavu jsou kolagenní vlákna v elastických arteriích zvlněná. A tato vlnitost stěžuje určení směru vlákna ve tkáni. Současné metody na vyhodnocování směru vláken obecně neumí určit globální směr vláken, tj. spojnicí koncových bodů, ale určují lokální směry (směr malé části vlny vlákna) a pomocí průchodu polarizovaného světla vzorkem. Na základě lokálních směrů nelze určit globální směr při velké vlnitosti, protože zvlnění může být nesprávně interpretováno jako dvě skupiny vláken. [3]

Výstupem algoritmu pro určování směrů je histogram úhlů lokálních směrů. Na Obr. 11 jsou k vidění histogramy při porovnání dvou vzorků s různou vlnitostí. U histogramu vpravo, kdy byl vzorek podstatně vlnitější než vlevo (prasečí Achillova šlacha), se nedá určit dominantní směr vláken. [3]

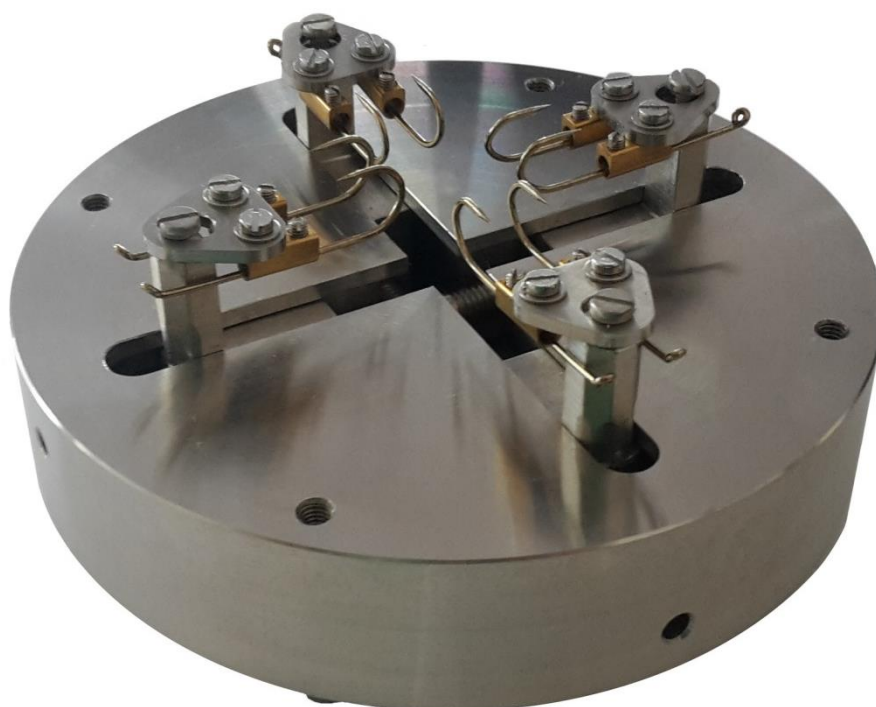


Obr. 11 Porovnání dvou tkání s různou vlnitostí kolagenních vláken [3]

Navrhovaný přípravek by měl odstranit nebo alespoň zmenšit vlnitost vláken a z histogramu by se poté měl dát jednoznačně určit globální směr vláken.

Samotná znalost směru je důležitá pro modelování chování tepen protože v závislosti na směrovém uspořádání vláken tepna mění své mechanické vlastnosti – pevnost a podobně (sečný modul pružnosti v tahu aorty $E \sim 0,5 \text{ MPa}$). [3]

2 NÁVRH PŘÍPRAVKU



2.1 Obecné informace

Přípravek popsáný na dalších stranách slouží k napínání biologických struktur za pomoci rybářských háčků. Výchozím tvarem pro napínání je čtverec a lze napínat nezávisle do dvou na sebe kolmých směrů.

Celý přípravek je koncipován tak, aby se dal vyrobit jen na soustruhu a frézce bez potřeby CNC obráběcího stroje, čímž případná výroba může probíhat i v „domácích“ podmínkách.

Málokdy se podaří něco vymyslet dokonale hned napoprvé, a tak byla snaha navrhnout přípravek co nejuniverzálnější, aby jednotlivé prvky mohly plnit vícero funkcí zároveň a aby se po výrobě dal přípravek snadno modifikovat a případné vady jednoduše odstranit. Zároveň tím odpadá jednoúčelovost zařízení a dá se tak použít i pro další aplikace.

Návrh se snaží vysvětlovat, k čemu jednotlivé prvky či details slouží, tak aby osoba nechávající přípravek vyrábět nebo inovovat snadněji odhalovala jejich význam a mohla výkresy dle vlastního uvážení měnit.

Tab. 3

Základní informace	
Rozměry	<i>Ø120x51 mm</i>
Maximální/minimální vzdálenost čelistí	<i>85/42 mm</i>
Maximální/minimální vzdálenost háčků	<i>0/38 mm</i>
Řešení posuvu	Mechanický Pohybové šrouby
Velikost posuvu	<i>2 mm/ot.</i>
Základní materiál	Nerezová ocel DIN 1.4404
Hmotnost	<i>1482 g</i>

2.2 Návrh řešení

Pro napínání aorty bylo uvažováno několik variant přípravku. Zvolen byl typ, kdy bude z aorty vyříznut čtvercový vzorek, který bude následně upnut do přípravku a bude napínán jako 2D těleso.

Pro upnutí vzorku byly zvažovány varianty napíchnutí na trny, upnutí rybářskými háčky na vlascích nebo rybářskými háčky na vahadle. Zvolena byla možnost třetí.

2.3 Princip funkce

Jak bylo výše zmíněno, přípravek napíná planární vzorek aorty. Vzorek je upevněn do přípravku pomocí osmi rybářských háčků, které jsou na vahadlech připevněny k čelistem. Čelisti jsou umístěny v základně a pohybují se otáčením pohybového šroubu směrem od sebe a k sobě symetricky, čímž dochází k napínání vzorku. Pohyb čelistí musí být symetrický, aby byl střed vzorku stále uprostřed přípravku.

Vhodnost popsaného upevnění aorty byla kontrolována s prací [10], kde se podrobně rozebírá uchycení planárních vzorků tepen.

Přípravek se poté s nataženým vzorkem otočí vzhůru nohama a vzorek se namočí do roztoku formaldehydu. Natahovací část přípravku se kromě části čelistí nenamáčí. Ponořeny jsou však úchyty s háčky.

2.4 Výpočtová část

Vzhledem k velikosti přípravku, kdy se nepředpokládalo velké zatížení komponent od napínané tepny, byla limitující spíše minimální velikost jednotlivých komponent, aby se s nimi dalo pohodlně pracovat. Pevnostní výpočet byl aplikován pouze u závitové tyče a rybářských háčků, neboť se na první pohled jednalo o součásti, které se mohou porušit jako první.

2.4.1 Délka drážky pro pohyb čelistí

Délka drážky musí být natolik dlouhá, aby poskytovala prostor pro natažení na požadované prodloužení o 30 %.

$$l_{min} = 1,3 \cdot a + 2 \cdot (l_{hacek} + l_{uchyt}) \quad (2)$$

Kde a je délka strany vzorku, v tomto případě je zvolen vzorek s délkou strany $a = 18 \text{ mm}$ (dle [10])

l_{hacek} vysazení háčku, $l_{hacek} = 15 \text{ mm}$ a

l_{uchyt} odhadovaná délky úchytu od čelistí po upnutí háčku, $l_{uchyt} = 15 \text{ mm}$

Tedy:

$$l_{min} \doteq 83 \text{ mm}$$

Aby byla zaručena velikost protažení přes všechny nečekané problémy, byla délka drážky zvolena:

$$l = 100 \text{ mm}$$

2.4.2 Namáhání pohybového šroubu

Vzorek vlivem akce a reakce při natahování působil silou na čelisti a tedy i na závit. Tento závit byl zvolen velikosti $M6 \times 1$. Z kontroly na otláčení závitu byla určena maximální síla, která může na závity působit: [11]

$$p = \frac{4F}{\pi(d^2 - D_1^2)n_z} \quad (3)$$

Kde p je tlak v závitu, v tomto případě maximální dovolený tlak $p_D = 12 \text{ MPa}$ [11];

F zátěžná síla;

d jmenovitý (velký) průměr závitu; $d = 6 \text{ mm}$;

D_1 malý průměr závitu; $D_1 = 4,917 \text{ mm}$ a

n_z počet funkčních závitů, $n_z = 2$ – předpoklad, že zatížení nesou první dva závity

Po vyjádření síly F :

$$F = \frac{p_D \pi (d^2 - D_1^2) n_z}{4} \doteq 220 \text{ N} \quad (4)$$

Tato hodnota je pouze orientační, protože maximální hodnota dovoleného tlaku je určována experimentálně. Vypočtená velikost síly bude následně porovnána se silou, která působí na háčky, aby se zjistilo, zda nedojde k otláčení závitů.

2.4.3 Namáhání háčku

Síla vyvolávající smluvní napětí σ_R v aortě se vypočte dle vztahu: [12]

$$F = \sigma_R S_0 \quad (5)$$

Průřez S_0 je dán rozměry nezátíženého vzorku.

Testovaný vzorek pocházel z prasečí aorty a měl rozměry $18 \times 18 \times 1,44 \text{ mm}$.

Tloušťka byla měřena na pěti různých místech a z naměřených hodnot (Tab. 4) byla určena průměrná tloušťka t vzorku.

Tab. 4 Tloušťka aorty

Č. měření	Tloušťka t [mm]
1	1,52
2	1,47
3	1,41
4	1,50
5	1,31

$$t = (1,44 \pm 0,08) \text{ mm}$$

Po dosazení do vztahu (5):

$$F = 0,72 \cdot 10^6 \cdot 0,018 \cdot 0,00144 \doteq 20 \text{ N} \quad (6)$$

Do vztahu bylo dosazeno větší z napětí uvedené v kapitole 1.4 Mechanické vlastnosti aorty – $\sigma_{R11} = 0,72 \text{ MPa}$

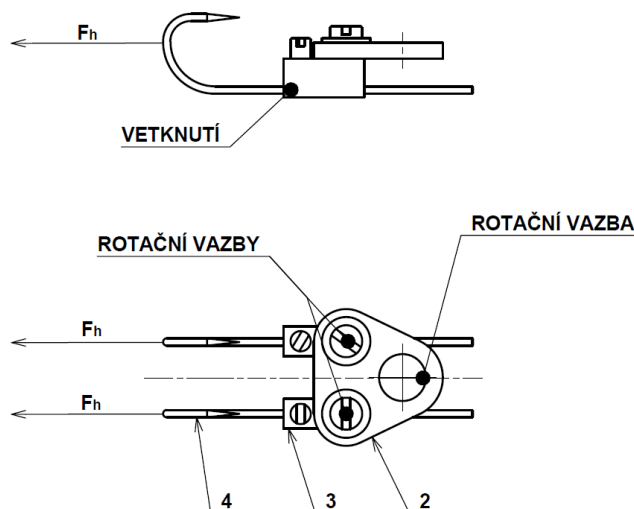
K otlačení závitů tedy nedojde.

Tepna je z každé strany uchycena dvěma háčky, tedy síla působící na jeden háček F_h je poloviční.

$$F_h \doteq 10 \text{ N}$$

Na Obr. 12 je znázorněno schéma úchytu háčku společně s označením vazeb.

Ve směru šipky bude působit síla, jen pokud bude namáhání vzorku jednoosé.



Obr. 12 Vazba úchytu háčků

Předpoklady

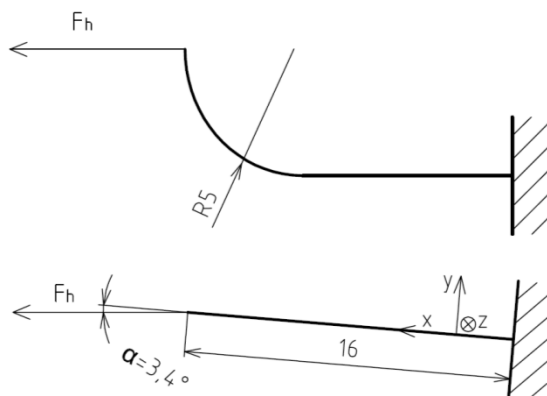
Tělesa 2 a 3 jsou mnohem tužší než háček, předpokládá se tedy deformace jen háčku.

Upevnění háčku stavěcím šroubem je pokládáno za vetknutí.

Háček je považován za prutové těleso vzhledem k tomu, že délka je mnohem větší než jeho průměr.

Při upnutí aorty dle [10] se po napnutí háček pootočí v rotační vazbě mezi vložkou svorkovnice a plechem o úhel $\alpha = 3,4^\circ$, takže síla nebude působit v rovině háčku.

Těmito předpoklady se případ zjednoduší na namáhání prutu dle Obr 13.



Obr. 13 Model namáhání háčku

Nebezpečný průřez je ve vetknutí, kde působí následující napětí od normálové síly, ohybového a krouticího momentu: [12]

Tahové napětí

$$\sigma_N = \frac{F_h \cos(\alpha)}{\frac{\pi d^2}{4}} \doteq 12,7 \text{ MPa} \quad (7)$$

kde $d = 0,001 \text{ m}$ je průměr drátu háčku

Ohybové napětí

Vzhledem k tomu, že ve vetknutí působí dva na sebe kolmé ohybové momenty, je třeba určit, ve kterém místě je ohybový moment maximální:

$$\sigma_\varphi = \frac{M_{oy}}{J_y} \frac{d}{2} \sin(\varphi) + \frac{M_{oz}}{J_z} \frac{d}{2} \cos(\varphi) = \frac{32}{\pi d^3} (M_{oy} \sin(\varphi) + M_{oz} \cos(\varphi)) \quad (8)$$

$$M_{oy} = -F_h R \cos(\alpha) = -0,05 \text{ Nm} \quad (9)$$

$$M_{oz} = -0,016 F_h \sin(\alpha) = -0,0098 \text{ Nm} \quad (10)$$

Úhel φ je orientován od osy y k z a napětí σ_φ se vztahuje k povrchu háčku.

Z extrému funkce $\sigma_\varphi = f(\varphi)$ se určí úhel při kterém je σ_φ maximální

$$\frac{d\sigma_\varphi}{d\varphi} = 0 \Leftrightarrow \varphi = 259^\circ \quad (11)$$

$$\sigma_{\varphi max} = 519 \text{ MPa} \quad (12)$$

Napětí od krouticího momentu

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{0,005F_h \sin(\alpha)}{\frac{\pi d^3}{16}} = 15,5 \text{ MPa} \quad (13)$$

Dle teorie HMM: [12]

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_{\varphi max})^2 + 3\tau_k^2} = 532 \text{ MPa} \quad (14)$$

Tato hodnota redukovaného napětí je vysoká, nicméně rybářské háčky se kalí na vyšší tvrdost. [13] Materiál háčku byl pouze odhadnut – AISI 1141 se smluvní mezí kluzu po zakalení $R_e = 765 \text{ MPa}$. [11]

Z tohoto důvodu je hodnota bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti pouze orientační. [12]

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} \doteq 1,44 \quad (15)$$

Vzhledem k velikosti jednotlivých namáhání, by se dala zanedbat složka napětí od ohybového momentu M_{oz} a krouticího momentu M_k .

Poté se výpočet zjednoduší:

Zjednodušené ohybové napětí

$$|\sigma_o| = \frac{|M_{oy}|}{W_o} = \frac{32|M_{oy}|}{\pi d^3} = 509 \text{ MPa} \quad (16)$$

A celkové redukované napětí:

$$\sigma'_{red} = \sigma_N + \sigma_o = 522 \text{ MPa} \quad (17)$$

Chyba tohoto zjednodušení oproti přesné hodnotě je menší než 2 %.

2.5 Popis jednotlivých komponent

2.5.1 Vyráběné součásti

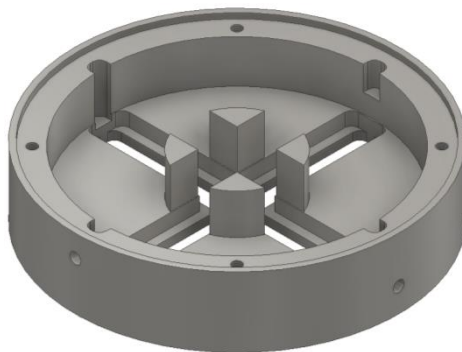
2.5.1.1 Základna (číslo výkresu 3-1-1)

Základnu přípravku tvoří dutý válec s podstavou o průměru 120 mm a výšce 26 mm . Uvnitř na dně se nacházejí čtyři vodící drážky pro čelisti, které se uprostřed spojují a tvoří kříž. Dále se zde nacházejí čtyři malé drážky, které zajišťují polohu Anglického šroubu. Ve dvou z těchto drážek se nachází otvor na vnější obvod základny a slouží jako přístup pro otáčení šrouby.

Uprostřed se nachází čtyři vysunuté čtvrtkruhy, vysunutí je o 1 mm nižší než je osazení pro Krycí plech. Význam má pouze jeden, zbylé tři jsou pozůstatkem po obrábění a z hlediska časové a finanční úspory jsou ponechány. Onen jeden funkční (libovolný) je předpřipraven pro fixaci čelistí – pokud by byl někdy na přípravku napínán vzorek a čelisti by měly tendenci z tohoto či jiného důvodu se při napnutí vrátit zpět k sobě, stačí udělat úpravu v podobě otvoru do Krycího plechu a otvoru se závitem do onoho čtvrtkruhu a šroubem lze vymezit vůli, kterou čelisti mají, čímž se zamezí jejich pohybu.

Po uvážení lze celé tyto bloky z výkresu vyjmout a vůbec je nevyrábět.

Na podstavě z vnější i vnitřní strany jsou otvory se závity. Zatímco z jedné strany slouží jako nohy přípravku šrouby držící krycí plech, z vnější strany lze našroubovat šrouby $M4 \times 25$, které pak slouží jako nohy pro případ, kdy je přípravek otočený vzhůru nohama a vzorek je namočený ve formalínu. Při správné délce zašroubování šroubů slouží přípravek zároveň jako víko na Petriho misku naplněnou formalínem a zabraňuje tak přílišnému odpařování roztoku.



Obr. 14 Základna

2.5.1.2 Anglický šroub (č. v. 4-3-1)

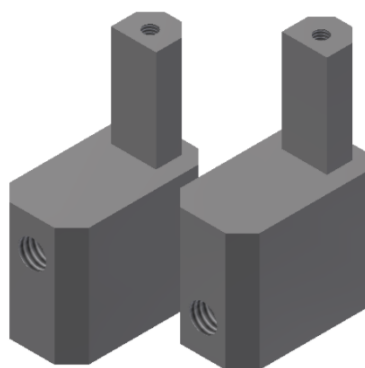
Tento šroub zajišťuje rozjždění čelistí směrem od a k rotační ose přípravku. Má dvě části – část s levotočivým a část s pravotočivým závitem – ty zajišťují, že se protilehlé čelisti rozjíždějí od sebe nebo sjíždějí k sobě. Závít je velikosti $M6 \times 1$. Byl zvolen metrický závít, který je pro pohybové šrouby neobvyklý, ale rovnoramenný lichoběžníkový závít se v takto malých rozměrech nevyrábí. Dále by takovýto závít měl příliš velké stoupání. V tomto provedení se stoupáním 1 mm je čelisti od sebe vzdálí o 2 mm na jednu otáčku šroubu. Výroba jemného

stoupání by byla vzhledem k tvrdosti oceli problematická a už v tomto případě byl kladen větší důraz na mazání řezu a ostrost nástroje.

2.5.1.3 Čelisti (č. v. 4-2-1 až 4-2-4)

Všechny čelisti se od sebe liší pouze v závitové části – Čelisti 1 a 2 mají pravotočivý a Čelisti 3 a 4 levotočivý závit a polohou závitu, který musí být ve dvou různých hladinách, aby se Šrouby nepotkaly (vzdálenost mezi šrouby je 3 mm).

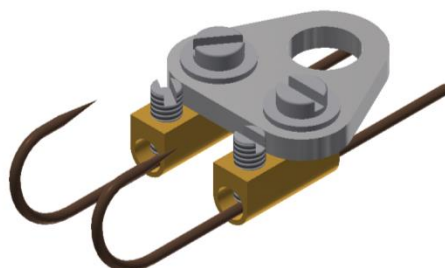
Čelisti mají výběžky vystupující 15 mm nad rovinu základny. Jejich účelem je vysunout tepnu do takové vzdálenosti od základny, aby byla tepna potopena do roztoku formaldehydu a zároveň aby roztok nepřišel do kontaktu se Základnou.



Obr. 15 Čelisti

2.5.1.4 Plech troj (č. v. 4-4-1)

Součást Plech troj je plech trojúhelníkového tvaru a má za funkci upnutí vložek svorkovnic a jejich uchycení k čelistem. Funguje jako vahadlo, což má tu výhodu, že eliminuje nepřesnosti při napichování tepny na háčky – pokud není tepna nepropíchnuta v přesně daných bodech, bude na každém háčku z dvojice jiné předpětí a v tepně při napínání různé napětí. Vahadlo se může natočit a tento jev tak eliminovat.



Obr. 16 Úchyt háčků

2.5.1.5 Plech krycí (č. v. 4-5-1)

Krycí plech zakrývá Základnu a zamezuje tak, aby čelisti vypadly ze Základny ven, čelisti při napínání kloužou po tomto plechu.

2.5.2 Kupované součásti

2.5.2.1 Vložka svorkovnice

Vložka slouží k pevnému upnutí háčku. Tuto součást je pro své rozměry jednodušší zakoupit než nechávat vyrábět.

Pro potřebu přípravku poslouží ohebná lustrvá svorkovnice s mosaznou vložkou. [14] Zásadní při výběru je, aby byla dimenzovaná pro dráty do 6 mm^2 průřezu a aby se vložka skládala jen z jednoho kusu. K dostání jsou i vložky sestávající se ze dvou kusů (ocelové), nicméně taková konstrukce je pro přípravek nevyhovující.

2.5.2.2 Rybářské háčky

Rybářské háčky slouží k uchycení vzorku. Háčky byly zvoleny dlouhé 38 mm o průměru 1 mm .² Délka háčku byla vybrána tak, aby se háček po upnutí dal považovat za prutové těleso, což byl jeden z předpokladů výpočtové části. Průměr byl omezen nabídkou trhu. Vhodnost vybraného průměru byla kontrolována s prací [10].

Háčky je možné podle potřeby zkrátit, na přípravku je zanechaná volnost pro délku háčků, aby se daly upínat různé velikosti vzorků.

2.5.2.3 Spojovací materiál

Na přípravku se vyskytují pouze šrouby s vnitřním šestihranem a šrouby s válcovou hlavou a drážkou. Celý přípravek lze tedy obsluhovat jen za pomoci klíče IMBUS 3 mm a plochého šroubováku. Šířka funkční části šroubováku musí být do 4 mm , protože se šroubovák musí dostat k Anglickému šroubu skrze otvor velikosti $\varnothing 4\text{ mm}$ na boku Základny.

² Jedná se tzv. *streamrové háčky* – speciální háčky s prodlouženým raménkem, na které se přivazují streamrové vlasy a jiné díly tak, aby poté háček připomínal malou ryбку.

2.6 Výběr materiálu

2.6.1 Vyráběné součásti

Výběr materiálu je podřízen funkci přípravku a prostředí, ve kterém se bude nacházet. Jelikož bude pracovat s biologickými materiály, je nežádoucí, aby korodoval a mohla nastat situace, že by následná koroze znehodnotila připravovaný vzorek. Dalším z požadavků na odolnost materiálu je schopnost odolávat účinkům formalínu, neboť část přípravku do něj bude přímo ponořena a část bude vystavena jeho výparům.

Z výše zmíněných důvodů je na výrobu součástí navržena korozivzdorná austenitická ocel DIN 1.4404. Ekvivalentní oceli jsou 17 349 ČSN 42 0002, X2CrNiMo 17-12-2/EN10088-2 nebo AISI 316L. [15]

Jedná se o ušlechtilou konstrukční ocel s nízkým obsahem uhlíku legovanou především chromem, niklem a molybdenem. Tato ocel je vhodná pro chemický, farmaceutický či potravinářský průmysl. Má zvýšenou odolnost vůči všem typům koroze a je odolná i proti koncentrovaným organickým i anorganickým kyselinám. [16]

Vzhledem k tomu, že každý výrobce vlastnosti svých ocelí popisuje odlišně a mnohdy u jedné a též oceli jsou napříč výrobci udávány protichůdné vlastnosti ([16] a [15]), byl kladen větší důraz na to, aby se daná ocel používala obecně pro chemický průmysl. Tato ocel byla z možných kandidátů vybrána například proto, že je běžně dostupná a vzhledem k menšímu množství uhlíku oproti oceli DIN 1.4401 je snáze obrobitelná. [18]

Tab. 5 Chemické složení oceli DIN 1.4404 [18]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	N
Hm. %	≤ 0,03	≤ 1	≤ 2	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,11
	Cr	Mo	Ni	Ti		
	16,5 – 18,5	2 – 2,5	10 – 12	-		

Tab. 6 Mechanické vlastnosti oceli DIN 1.4404 [19]

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
220	520 – 670	45

2.6.2 Kupované součásti

Pro zhotovení přípravku jsou použity tři druhy nakupovaných součástí – spojovací materiál, vložky svorkovnice a rybářské háčky.

2.6.2.1 Spojovací materiál – šrouby a podložky

Jako spojovací materiál byly použity šrouby a podložky z korozivzdorné oceli. Označení materiálu šroubů je A4, což značí korozivzdornou ocel DIN 1.4401. [20] Pokud nebyl k dostání spojovací materiál v této jakosti, byl použit s označením A2, příp. A1. Volba horších jakostí není nejlepší, ale bude muset

postačit. V balení se u přípravku nachází i několik náhradních dílů pro případ výměny korodujícího prvku.

Dle [21] základní pozinkované ocelové šrouby nevyhovují nárokům, protože formaldehyd na povrchu zinku oxiduje na kyselinu mravenčí, která v krajních případech odkoroduje vrstvu až $20 \mu\text{m/měsíc}$.

2.6.2.2 Vložka svorkovnice

Tato vložka je vyrobena z mosazi, která by měla odolávat účinkům formalínu. [22], [23] Nicméně podle studie [24] zaměřené na muzejní podmínky, kde byl posuzován dlouhodobý vliv chemikálií určených ke konzervování vzorků na okolní prostředí, se už po 30 dnech vytvořily změny na povrchu mosazi.

Tato součást se v nerezovém provedení nevyskytuje. Existuje jiný typ vložky do svorkovnice, ocelová s pozinkovaným povrchem, ale vzhledem ke konstrukci této vložky a nevhodnosti pozinkované povrchové úpravy je navržena spíše případná výroba původní vložky z nerezového materiálu podle přiloženého výkresu (č. v. 4-00-1).

2.6.2.3 Rybářské háčky

Rybářské háčky se vyrábějí s mnoha povrchovými úpravami nanášením povlaků např. niklu, zinku nebo také poniklované s kompozitním povlakem s teflonem. Vzhledem k tomu, že o účincích formalínu na poniklované povrchy se nepodařilo dohledat žádná data, byly zvoleny atypické háčky s bronzovým povlakem, který rovněž jako mosaz odolává vlivu formalínu. [22], [23]

2.7 Volba tolerancí a drsností

2.7.1 Rozměrové tolerance

Úchytky rozměrů byly určovány na základě platných norem nebo poznatků z učebnice Základy konstruování [25], kdy pro surná uložení byla předepisována doporučená velikost vůle atp. Ostatní nefunkční rozměry jsou tolerovány podle platné normy ČSN ISO 2768-1 [26], zvolena třída přesnosti *m*.

2.7.2 Geometrické tolerance

Vzhledem k rozměrům přípravku a zvoleným rozměrovým tolerancím stačilo předepsat pouze toleranci souměrnosti drážek, aby čelist vždy zapadla do svých vodících drážek a toleranci polohy děr pro šrouby na základně a krycím plechu. Pro ostatní úchytky stačí hodnoty definované normou ČSN ISO 2768-2 [27], třída přesnosti *H*.

2.7.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu byla zvolena opět podle doporučených hodnot v [25]. Její hodnota měla význam především v místech, kde se součásti pohybovaly surně. Ve většině případů se jednalo o hodnoty *Ra* 3,2. Neobrobené plochy se nacházely na součástech, jejichž polotovarem byl plech.

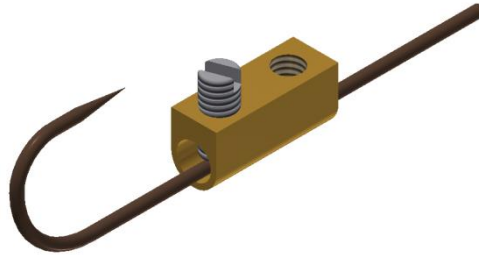
Nikde nebylo zapotřebí povrch brousit, leštit či jinak podobně upravovat.

2.8 Montážní postup

K montáži přípravku je třeba klíč IMBUS 3 mm a plochý šroubovák.

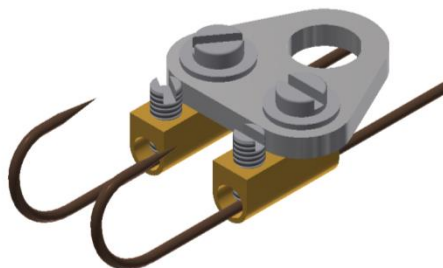
2.8.1 Úchyt háčků

1. Ze svorkovnice se vyšroubují šroubky a vysunou dvě mosazné vložky.
2. Do každé vložky se zasune háček, tak aby vyčníval přibližně 15 mm na straně s hrotem. Háček je třeba utáhnout jedním stavěcím šroubem *M2,5x5 DIN 551/A1*.



Obr. 17 ad 2.

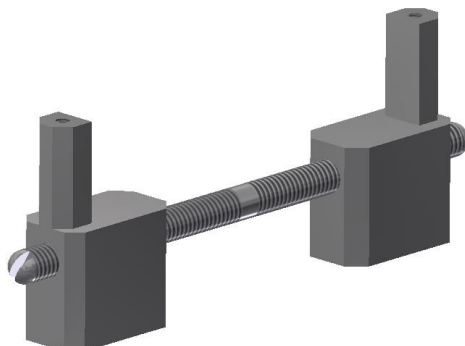
3. Následně se obě vložky přišroubují šrouby *M2,5x5 DIN 84A/A2* k součásti Plech troj, pod šrouby náleží podložky *2,7 DIN 125A/A4*.
4. Správné seřízení háčků a vložek mocí šroubů je takové, že jsou osově symetrické podle osy součásti Plech troj a zároveň pokud je plech vodorovně, rovina háčků je být svislá.



Obr. 18 ad 4.

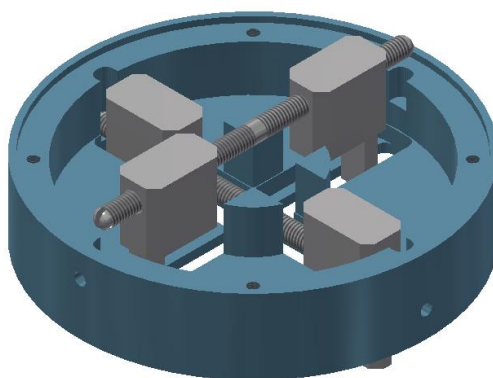
2.8.2 Natahovací část přípravku

1. Je třeba připravit jeden Anglický šroub a Čelisti 1 a 3
2. Čelist 1 se našroubuje na stranu Šroubu se zářezem, Čelist 3 na opačnou stranu. Výstupky čelistí míří směrem od sebe.



Obr. 19 ad 2.

3. Zašroubování čelistí se provádí o stejný počet závitů, aby se zajistila jejich stejná vzdálenost od kraje šroubu.
4. Stejný postup se aplikuje na druhý Anglický šroub a Čelisti 2 a 4.
5. Takto přichystané čelisti se spustí do Základny, Anglický šroub zapadne do drážek, výstupky čelistí zapadnou do průchozí drážky a skrze otvor na boku Základny je vidět zářez pro šroubovák ve Šroubu.

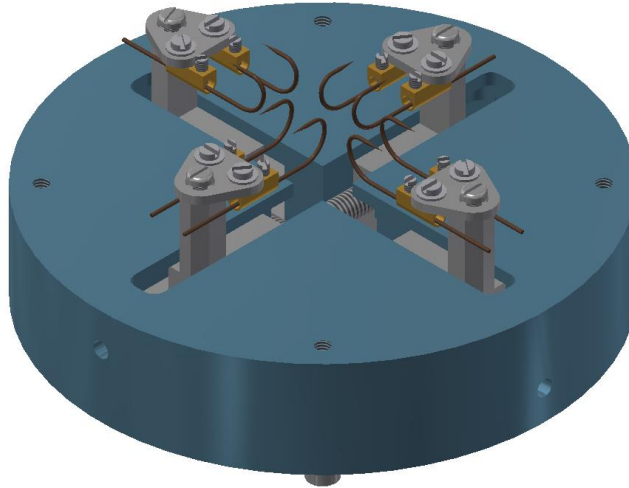


Obr. 20 ad 5.

6. Základna se uzavře součástí Plech krycí a pomocí čtyř šroubů *M4x8 DIN 912/A4* a podložek *4,3 DIN 125A/A4*.

2.8.3 Kompletní přípravek

V závěru se zašroubují 4 šrouby *M3x6 DIN 84/A2* do děr v čelistech tak, aby hlavy nedosedaly na čelist, ale vystupovaly přibližně *2,5 mm* nad. Přes hlavy šroubů se volně nasadí Úchyty háčků (díra v úchytu je mírně větší než hlava). Aby Úchyty fungovaly jako vahadlo, je třeba ještě povolit šrouby držící vložky svorkovnice, aby se mohly volně natáčet.



Obr. 21 Kompletní přípravek

2.9 Úpravy přípravku

Během výroby a poté ve fázi testování nebylo nutné dělat zásadní změny v konstrukci oproti původnímu návrhu. Bylo provedeno pouze pár úprav, které jsou uvedeny níže:

- Hloubka závitů byla vyráběna maximálně do trojnásobku jeho průměru. Jedná se o technologickou úpravu, aby se předešlo zalamování závitníku.
- Na základně mezi vyfrézovanými čtvrtkruhy a drážkou pro čelisti je odsazení 0,3 mm. Jedná se o usnadnění a urychlení obrábění, kdy se může nástroj v době, kdy frézuje válec, ze kterého později čtvrtkruhy vzniknou, pohybovat větší rychlostí.
- V původním návrhu se pracovalo s variantou, kdy zahnutí háčků mířilo směrem dolů. Od tohoto bylo ustoupeno při testování, protože se vlivem natahování tepny úchyty vylamovaly směrem nahoru a vahadlo ztrácelo svou funkci. Nyní zahnutí míří nahoru.
- S ohledem na jednodušší napichování tepny byly zpětné hroty ohnuty zpět k háčku.

2.10 Mazání

V přípravku se sice vyskytují dva posuvné šrouby a čelisti se pohybují suvně, bylo by tedy lepší styk součástí mazat, ale vzhledem k tomu, že se nejedná o nikterak namáhané části a k napínání tepny bude stačit jen malá síla, je zamýšleno, že přípravek nebude nijak mazán. Nenastane tak situace, že by mazivo nějakým způsobem narušilo zkoumaný vzorek či roztok formaldehydu.

2.11 Balení a skladování

Natahovací část přípravku nepotřebuje žádné speciální balení, ideální je krabice o rozměrech $200 \times 150 \times 100$ mm do které je vložena spolu se zvláště zabalenými úchyty háčků, náhradními díly, šroubovákem a klíčem. Úchyty háčků je doporučeno hroty háčků zapíchat do kusu gumy (postačí guma na mazání obyčejné tužky), a poté je zabalit např. do ubrousku. Zmenší se tak možnost poranění, které by mohlo mít za následek případnou nákazu nemocí. Při zkoumání biologických struktur totiž není známá přesná historie tkáně a mohlo by se stát, že byl člověk nebo zvíře, ze kterého aorta pochází, nakažen např. žloutenkou.

2.12 Další varianty konstrukce

Při návrhu konstrukce přípravku bylo uvažováno několik různých koncepcí tvaru základny a jak upevnit a následně napnout vzorek od kterých bylo posléze ustoupeno z různých důvodů. Rozpracování komponent se odvíjí od toho, kdy byl návrh opuštěn. Výběr se nachází níže.

2.12.1 Varianta č. 1

Tato varianta se zabývá druhem svorky, která měla uchycovat vzorek. Funguje tak, že se na pevnou část přiloží okraj vzorku a následně je přišroubován přítlačný plech.

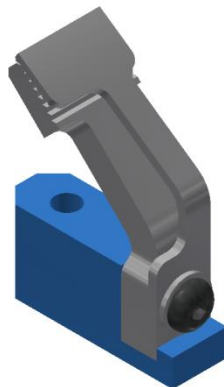
Přestože by tato sponka plnila svou funkci, nebyla použita, protože by musel být použit jiný, větší kus vzorku, aby se tak předešlo velkým deformacím a trhání v rozích vzorku. Podobná konstrukce by se dala využít pro žaludeční stěnu nebo jiné měkké tkáně velkých ploch.



Obr. 22 Svorka varianta č. 1

2.12.2 Varianta č. 2

Varianta č. 2 zpracovává opět typ sponky. Zde by upevnění zajišťovalo přítlačování dvou předepjatých plechů. Varianta nebyla použita opět z důvodu nevyhovujícího tvaru a rozměru vzorku.

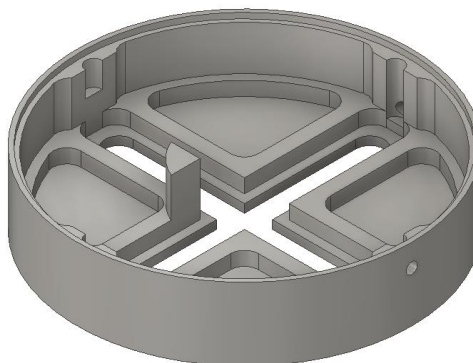


Obr. 23 Svorka varianta č. 2

2.12.3 Varianta č. 3

Zde byla zvažována jiná vnitřní podoba základny. Funkční prvky se neliší od současné podoby, ale byl kladen důraz na minimální hmotnost přípravku. Hmotnost této základny je přibližně 650 g na rozdíl od současné hmotnosti 1050 g.

Varianta nebyla použita, jelikož by výroba byla časově i finančně náročná a u přípravku nezáleží na jeho hmotnosti.



Obr. 24 Odlehčená základna

3 VÝSLEDKOVÁ ČÁST

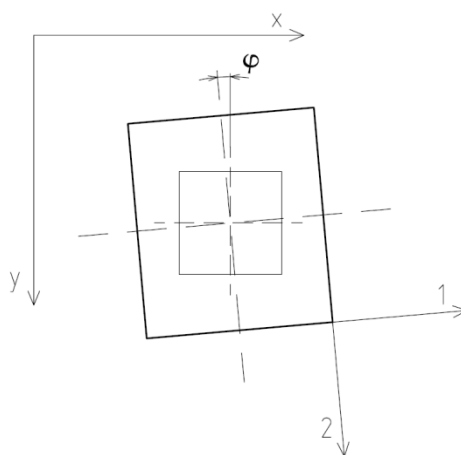
3.1 Popis testu

Přípravek byl vyroben (viz fotografie v kap. 2) a byla na něm provedena zkouška natažení vzorku aorty, aby se ověřilo, zda umožňuje zadané protažení vzorku o 30% v obou směrech.

Pro experiment byla použita prasečí hrudní aorta o rozměrech $18 \times 18 \times 1,44$ mm. Vzorek byl upnut dle zadaných rozměrů v [10] a do středu nakresleny čtyři tečky pro pozdější vyhodnocení. Natahování bylo prováděno stejnoměrně v obou osách a vždy po půlotáčce šroubu, čemuž odpovídalo rozestoupení čelistí o 1 mm, byla udělána fotografie vzorku. Natahování probíhalo až do vytržení háčků ze vzorku. Následně byly fotografie nahrány do programu Tibixus³, který podle posunu teček určil parametry deformace.

Při měření bylo třeba s přípravkem nijak neposouvat po podložce, aby nevznikalo chybné natočení teček.

Výstupem měření je Tab. 7. Ta uvádí jak přetvoření ve směru zatížení, tak i přepočítané na hlavní složky, které se mírně liší, protože vlivem nerovnoměrnosti dochází k jistým úhlovým deformacím vzorku, což je naznačeno na Obr. 25.

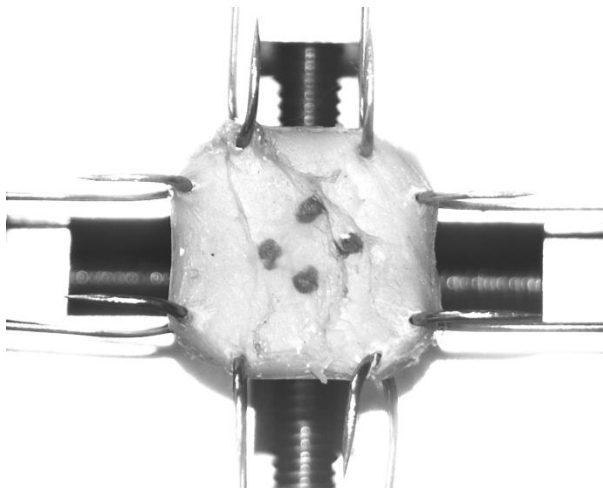


Obr. 25 Změna tvaru vzorku při natahování

³ Podrobnosti o programu na stránkách ÚMTMB VUT:

http://www.old.umt.fme.vutbr.cz/pdf/pdf_projekt.php?id=15

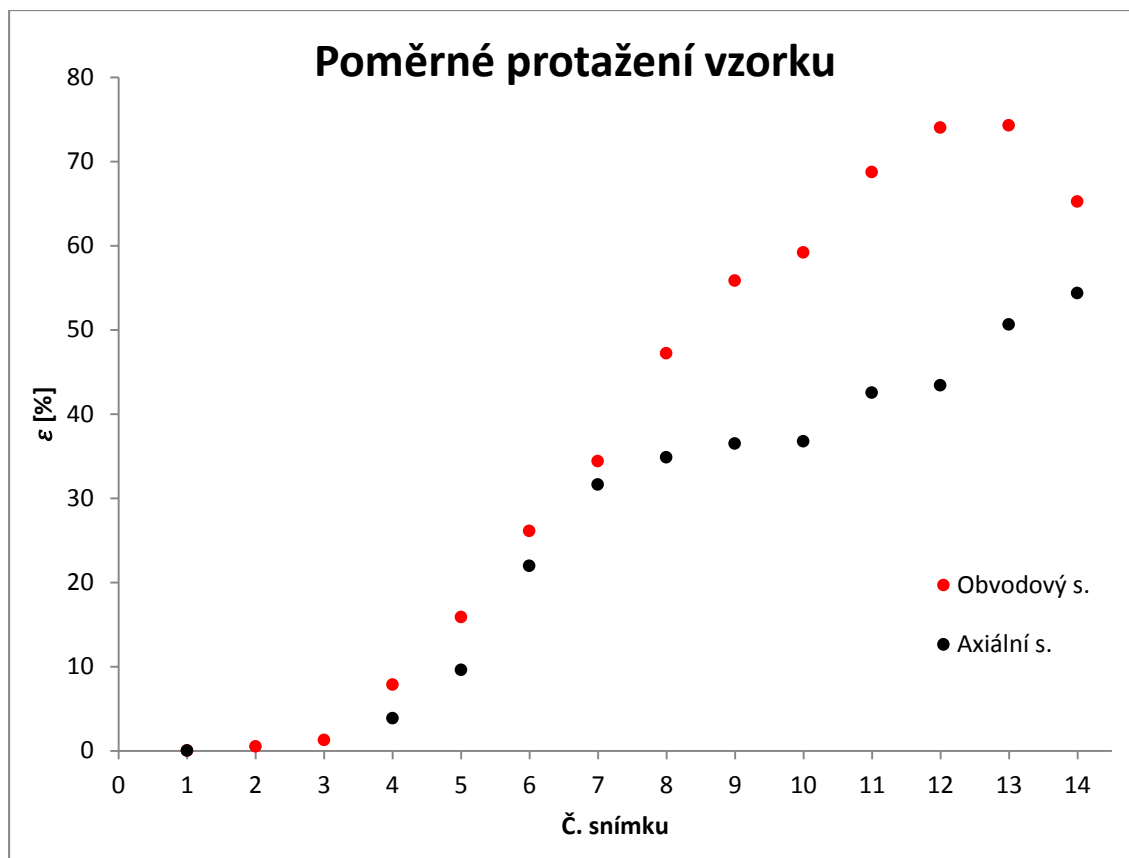
3.2 Naměřená data



Obr. 26 Fotografie nataženého vzorku

Tab. 7 Naměřená data

Č. snímku	ε_1 [%]	ε_2 [%]	φ [°]	Obvodový s. ε_x [%]	Axiální s. ε_y [%]
1	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
2	0,7	-1,2	0,02	0,5	-1,0
3	1,3	-0,6	0,09	1,3	-0,6
4	8,0	3,7	-0,22	7,8	3,8
5	15,9	9,6	-0,91	15,9	9,6
6	27,7	20,5	-2,97	26,1	21,9
7	34,6	31,4	-2,65	34,4	31,6
8	47,2	34,8	-3,11	47,2	34,8
9	56,1	36,3	-2,87	55,8	36,5
10	59,3	36,7	-3,16	59,2	36,7
11	68,8	42,5	-4,20	68,7	42,5
12	74,0	43,4	-3,37	74,0	43,4
13	74,3	50,6	-3,24	74,3	50,6
14	65,6	54,0	-1,49	65,2	54,4
15	57,1	27,1	-1,42	27,4	56,5



Obr. 27 Graf poměrného protažení

3.3 Diskuze výsledků

Přípravek prokázal svou funkci tím, že tepnu natáhl v obvodovém směru o 74 % a v axiálním o 54 %. Poté došlo k vytržení háčku což je patrné z poklesu protažení v obvodovém směru.

Protažení je neobvykle velké. Při přípravě testu vzorek rychle vysychal a po okrajích byla na dotyk cítit tuhost vzorku. Toto zpevnění oddálilo vytržení háčků. Zpevnění se vytvořilo už do hodiny práce se vzorkem, kdy byl mimo fyziologický roztok. Uprostřed se tkáň zdála beze změny. Stojí za zvážení, jestli by se tohoto jevu nedalo využít pro rovnoměrnější deformaci vzorku a potlačení vlivu vrubu v okolí háčku na celkový výsledek. Pokud je žádoucí se tomuto jevu vyhnout, je třeba pracovat rychle.

Přestože se jeví, že protažení rostlo na začátku exponenciálně a ve střední fázi lineárně v závislosti na posuvu, nic kromě velikosti protažení se z grafu vyčíst nedá, protože otáčení o půlotáčky posuvným šroubem bylo nepřesné. Velikost přetvoření musí být tedy vyhodnocována počítačovým softwarem, jeho velikost závisí nejen na posuvu, ale i na vlastnostech materiálu v různých směrech, což je patrné z rozdílu naměřených hodnot (posuvy mezi jednotlivými snímky byly stejné).

Na prvních snímcích je vidět minimální protažení. Je třeba vzít v potaz, že zde také docházelo k vymezení vůlí na vahadle a roztažení otvoru pro háček.

Z velikosti úhlu φ v Tab. 7 plyne, že bylo s přípravkem buď v průběhu měření pootáčeno, nebo, a to je více pravděpodobné, že tečky nebyly umístěny symetricky okolo středu.

ZÁVĚR

Na začátku práce byly stanoveny dva cíle – seznámit se s teorií pojivových tkání a navrhnout přípravek na jejich natahování.

Přestože to třeba z této práce není zřejmé, ušel jsem od října loňského roku velký kus cesty a mnohonásobně jsem si zvětšil obzor v oblasti biologie.

Největší přínos pro mě však měl samotný návrh přípravku, kdy jsem dostal možnost vyřešit projekt od myšlenky až po finální testování přípravku. Bylo velmi přínosné řešit problémy (z nichž většina ani není v této práci uvedena) v oblastech návrhu materiálu, pevnostních výpočtů, technologických úprav, průzkumu trhu atd. a na konci vidět hotový funkční přípravek.

Pokud bych měl vyzdvihnout nějaký z výstupů práce, bylo by to vysychání aorty na okrajích, v čemž vidím možnosti využití v budoucnosti.

Věřím, že práce měla smysl a směry vláken určené za pomoci navrženého přípravku budou mít mnoho aplikací. Z toho důvodu bych se chtěl o danou problematiku dále zajímat.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Srovnání epitelu a pojivové tkáně [4]	16
Obr. 2 Srdeční svalová tkáň [4]	17
Obr. 3 Řez nervovou tkání [4]	17
Obr. 4 Struktura kolagenního vlákna [7], (upraveno).....	19
Obr. 5 Kolagenní vlákna zobrazená elektronovým mikroskopem [8].....	20
Obr. 6 Řez elastickou arterií [4].....	21
Obr. 7	22
Obr. 8	22
Obr. 9	22
Obr. 10 Graf závislosti Cauchyho napětí na poměrném protažení [9].....	23
Obr. 11 Porovnání dvou tkání s různou vlnitostí kolagenních vláken [3]	24
Obr. 12 Vazba úchytu háčků	29
Obr. 13 Model namáhání háčku	30
Obr. 14 Základna	32
Obr. 15 Čelisti	33
Obr. 16 Úchyt háčků	33
Obr. 17 ad 2.	38
Obr. 18 ad 4.	38
Obr. 19 ad 2.	39
Obr. 20 ad 5.	39
Obr. 21 Kompletní přípravek	40
Obr. 22 Svorka varianta č. 1	42
Obr. 23 Svorka varianta č. 2	42
Obr. 24 Odlehčená základna.....	43
Obr. 25 Změna tvaru vzorku při natahování	46
Obr. 26 Fotografie nataženého vzorku	47
Obr. 27 Graf poměrného protažení	48

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Zemřelí 2016. *Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.uzis.cz/publikace/zemreli-2016>
- [2] VAVERČÁKOVÁ, P. *DEFORMAČNĚ-NAPĚŤOVÁ ANALÝZA ARTERIÁLNÍCH ANEURYZMAT* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16524/Vavercakova_Petra_DP_final.pdf?sequence=-1. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Burša, Ph.D..
- [3] BURŠA, J. *Opory pro předmět Biomechanika III.* 2017. Brno.
- [4] ROSS, Michael H., Edward J REITH a Lynn J ROMRELL. *Histology: a text and atlas.* 2nd ed. Baltimore: Williams, 1989, xx, 783 s. : il. ISBN 0-683-09887-X.
- [5] Basal lamina. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Basal_lamina
- [6] EMBRYONIC CONNECTIVE TISSUE, CONNECTIVE TISSUE PROPER, ADIPOSE TISSUE. *Pomorski Uniwersytet Medyczny w Szczecinie*[online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://www.pum.edu.pl/__data/assets/file/0005/76946/PDF_Dentistry_Connective_adipose_2014_15.pdf
- [7] VOET, Donald a Judith G VOET. *Biochemistry.* 3rd ed. Hoboken: John Wiley, 2004, xv, 1591 s. 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 0-471-39223-5.
- [8] SHERMAN, Vincent R. a Maria I. LOPEZ. Transmission electron micrograph of the collagen fibrils in rabbit skin. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Collagen#/media/File:Collagen_fibrils_in_rabbit_skin.jpg
- [9] BURŠA, J. a M. ZEMÁNEK. *Evaluation of Biaxial Tension Test of Soft Tissues.*, 11.
- [10] SLAŽANSKÝ, M., S. POLZER, V. MAN a J. BURŠA. Analysis of Accuracy of Biaxial Tests Based on their Computational Simulations. *Strain: An International Journal for Experimental Mechanics.* 2016, 52(52), 12.
- [11] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí.* V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [12] JANÍČEK, Přemysl. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I.* Brno: CERM, 2004, 287 s. : obr. ISBN 80-214-2592-X.
- [13] Jak vzniká háček. *MRK.cz: Stále na rybách* [online]. 26. 4. 2012 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.mrk.cz/clanek.php3?id=1078>

- [14] Svorkovnice SVL 2,5. *GES electronics* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.ges.cz/cz/svorkovnice-svl-2-5-GES06600643.html>
- [15] NEREZOVÁ OCEL 1.4404. *INOX* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>
- [16] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ (ZKRÁCENO). *ITALINOX* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [17] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ (ZKRÁCENO). *ITALINOX* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [18] CHEMICKÉ SLOŽENÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ. *ITALINOX* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/prehled-rozmeru-a-povrchu/chemicke-slozeni>
- [19] MECHANICKÉ VLASTNOSTI. *ITALINOX* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/prehled-rozmeru-a-povrchu/mechanicke-vlastnosti>
- [20] Druhy nerezových ocelí. *AKROS* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.akros.cz/druhy-nerezovych-oceli>
- [21] ČAPOUN, Karel a Michael BREMICKER. Několik slov ke korozi zinkových povlaků. *Tribotechnika* [online]. TechPark vydavatelství [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/nekolik-slove-ke-korozi-zinkovych-povlaku.html>
- [22] CRAIG, Bruce D. *Handbook of corrosion data*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c1995. ISBN 0-87170-518-4.
- [23] Chemical Resistance Chart for Various Pump Materials. *Plast-O-Matic, Valves, Inc.* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://plastomatic.com/epocap.pdf>
- [24] STRIEGEL, Mary F. The effects of gas phase formaldehyde on selected inorganic materials found in museums. In: HATCHFIELD, Pamela. *Objects Specialty Group Postprints*. 1. Washington D.C., 1992, s. 12.
- [25] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [26] ČSN ISO 2768-1 (014240) A: *Všeobecné tolerance. Nepředepsané mezní úchytky délkových a úhlových rozměrů*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [27] ČSN ISO 2768-2 (014406): *Všeobecné tolerance. Část 2, Nepředepsané geometrické tolerance = General tolerances. Part 2, Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [–] Pro výkresovou dokumentaci byla upravena šablona Ústavu konstruování VUT v Brně, [online]. [cit. 2016-10-11]. <http://www.ustavkonstruovani.cz/>

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace:

- 2-10-1 Přípravek final
- 3-20-1 Úchyt háčků
- 3-1-1 Základna
- 4-2-1 Čelist 1
- 4-2-2 Čelist 2
- 4-2-3 Čelist 3
- 4-2-4 Čelist 4
- 4-3-1 Anglický šroub
- 4-4-1 Plech troj
- 4-5-1 Plech krycí
- 4-00-1 Vložka

Obsah CD:

Sestavy

Modely jednotlivých součástí

Výkresová dokumentace ve formátu .dwg i .pdf

Další varianty konstrukce

Zdrojová data pro Tab. 7

Fotografie vzorku z průběhu testování