



**ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza inflačního experimentu elastomerní trubice

Matyáš Budinka

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Budinka** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **467300**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza inflačního experimentu elastomerní trubice

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of inflation experiment carried out with elastomer tube

Pokyny pro vypracování:

Vyložte základní vlastnosti polymerů
Uveďte aplikace polymerních trubíc
Popište experimentální metody používané při zjišťování mechanických vlastností polymerů
Analyzujte výsledky inflačně-extenzního experimentu provedeného s elastomerní trubící

Seznam doporučené literatury:

Kafková A (2017) Evoluce mechanických vlastností kompozitní kolagenní trubice v průběhu cyklického zatěžování. Bakalářská práce, ČVUT FS
Herda M (2016) Vliv rychlosti zatěžování na mechanickou odezvu cévní náhrady. Bakalářská práce, ČVUT FS
Beneš V (2015) Odhad rychlosti šíření pulsní vlny aortou, Bakalářská práce, ČVUT FS

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D., odbor biomechaniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Matyáš Budinka
Název BP:	Analýza inflačního experimentu elastomerní trubice
Anglický název:	Analysis of inflation experiment carried out with elastomer tube
Rok:	2019
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	Bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí BP:	doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 72
	Počet obrázků 73
	Počet tabulek 4
	Počet příloh 0
Klíčová slova:	Polymer, elastomerní trubice, inflačně - extenzní test, obvodová deformace, axiální deformace
Keywords:	Polymer, elastomer tube, inflation – extension test, circumferential deformation, axial deformation
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá polymerními materiály a popisem nelineárních trubic. Pozornost byla soustředěna na analyzování dat naměřených inflačně – extenzním testem elastomerní trubice. V závěru jsou diskutovány jeho výsledky.
Annotation:	This bachelor thesis deals with polymer materials and description of nonlinear tube. It focuses on analyzing the data of elastomer tube measured by inflation – extension test. At the end the results of this test are discussed.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Analýza inflačního experimentu elastomerní trubice“ vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 12.5.2019

.....

Jméno Příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Lukáši Hornému, Ph.D za odborné konzultace, trpělivost a především za čas, který mi věnoval.

Obsah

1 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
2 ÚVOD.....	10
3 Polymerní materiály	12
3.1 Struktura	12
3.2 Tvar	12
Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru makromolekul	13
3.3 Molekulová hmotnost	13
3.4 Fázový stav.....	14
3.5 Syntéza polymerů.....	15
3.6 Rozdělení polymerů.....	17
3.7 Recyklace a třídění polymerů.....	18
4 Nelineární trubice	20
4.1 Tepny, žíly a kapiláry	20
Fyziologie cév.....	20
Anatomická stavba	20
4.2 Trávicí ústrojí.....	22
Jícen.....	22
Tenké a tlusté střevo	23
4.3 Silikonové hadičky v lékařství.....	24
4.4 Hadičky v automobilovém průmyslu	24
5 Nelineární mechanika	26
5.1. Deformace	26
5.1.2 Deformační gradient.....	26
5.1.3 Zavedení válcových souřadnic.....	27
5.2 Napjatost	29
5.2.1 Tenzor napětí	29
6 Experimentální metody použité pro zjišťování mechanických vlastností polymerů	31
6.1 Inflačně - extenzní experiment	31
6.1.1 Tubulární vzorek.....	31
6.1.2 Měření vzorků	32
6.1.3 Průběh experimentu.....	32
6.1.4 Zpracování dat.....	34
6.1.5 Obvodová a axiální deformace elastomerní trubice	36
6.2 Tahová zkouška polymerů	37

6.3 Tlaková zkouška polymerů.....	39
6.4 Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti.....	39
Vrypová – Martensova zkouška	39
Vnikací	40
Odrázové.....	41
6.5 Ohybová zkouška	41
6.6 Rázové zkoušky	42
7 Cíle analyzování experimentu.....	44
8 Vyhodnocení experimentálně naměřených dat	45
8.1 První a poslední cyklus – bez axiálního zatížení.....	46
8.2 Předposlední a poslední cyklus – bez axiálního zatížení.....	47
8.3 První a poslední cyklus – s axiálním zatížením 500g	49
8.4 Předposlední a poslední cyklus – s axiálním zatížením 500g	51
8.5 První a poslední cyklus – s axiálním zatížením 750g	53
8.6 Předposlední a poslední cyklus – s axiálním zatížením 750g	55
8.7 První a poslední cyklus – s axiálním zatížením 1000g	57
8.8 Předposlední a poslední cyklus – s axiálním zatížením 1000g	58
8.9 Porovnání prvních a posledních cyklů pro jednotlivá zatížení	61
9 Závěr.....	65
10 Seznam tabulek.....	67
11 Seznam obrázků	68

1 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Název
M_w	[kg·mol ⁻¹]	Hmotnostně střední molární hmotnost
M_n	[kg·mol ⁻¹]	Výpočetně střední molární hmotnost
T_g	[K]	teplota zesklnění
T_f	[K]	teplota toku
T_m	[K]	teplota tání
E_i	[mm]	bázový vektor ve směru i v referenční konfiguraci
e_i	[mm]	bázový vektor ve směru i ve zdeformované konfiguraci
X	[mm]	polohový vektor v referenční konfiguraci
x	[mm]	polohový vektor ve zdeformované konfiguraci
E	[kPa]	Modul pružnosti v tahu
σ	[kPa]	Smluvní napětí
ε	[1]	Relativní prodloužení
S_0	[mm ²]	původní průřez zkušebního tělesa
L_0	[mm]	počáteční délka zkušebního tělesa
σ_M	[MPa]	meze pevnosti v tlaku
σ_B	[MPa]	napětí při kterém dojde k destrukci zkušebního vzorku
σ_{fM}	[MPa]	mez pevnosti v ohybu
$M_{o,max}$	[Nm]	maximální ohybový moment
W_o	[mm ³]	průřezový modul v ohybu

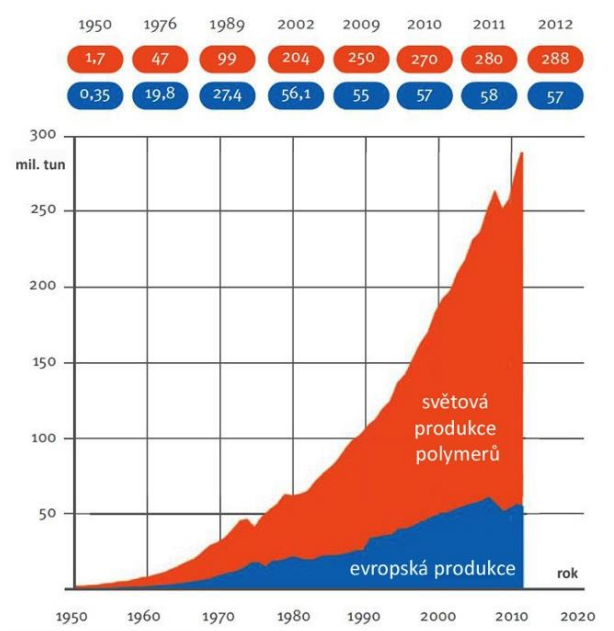
α_{cU}	[kJ/m ²]	rázová houževnatost (bez vrubu)
α_{cN}	[kJ/m ²]	rázová houževnatost (s vrubem)
E_c	[kJ]	kinetická energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa bez vrubu
E_N	[kJ]	kinetická energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa s vrubem
h	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa
b	[mm]	šířka zkušebního tělesa v milimetrech
b_N	[mm]	šířka zkušebního tělesa pod vrubem
$\lambda_{T1,2}$	[px]	obvodová deformace (radiální), kamera1, kamera2
$\lambda_{Z1,2}$	[px]	délková deformace (axiální) (radiální), kamera1, kamera2
\mathbf{t}		vektor intenzity vnitřních sil
$\boldsymbol{\sigma}$		tenzor napětí

2 ÚVOD

V historii bylo zvykem označovat dobu podle dominantně využívaného materiálu například doba bronzová, doba kamenná atd. pokud bychom v této logice pokračovali, bylo by na místě označit dnešní dobu dobou polymerní. Polymerní materiály mají širokou škálu využití počínaje automobilovým, leteckým, zdravotním i elektrotechnickým průmyslem. Zkrátka se používají téměř všude díky svým rozmanitým mechanickým a fyzikálním vlastnostem.

Ve srovnání s kovy jsou výhodnější nižší ekonomickou náročností na výrobu a především nižší hustotou z které logicky vyplývá nižší hmotnost daného výrobku. Dalším důležitým faktorem je estetické zdokonalení vzhledu výrobků zejména používaných v domácnosti, kde by se stala manipulace s celokovovými výrobky nepříjemnou.

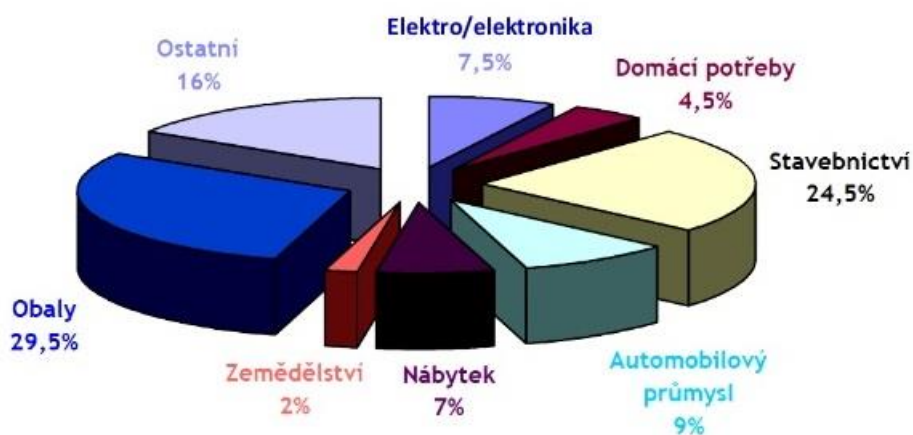
Polymery vykazují i mnohé jiné užitečné vlastnosti jako například korozní odolnost, elektroizolační vlastnosti, dobré tlumení zvuku, vibrační a především snadnou zpracovatelnost. Na výrobu polymerů jsou s postupující dobou kladeny vyšší nároky z hlediska vyrobeného množství i kvality. Produkce polymerů je možno posoudit z obr 1. [1]



Obrázek 1: Produkce polymerů v závislosti na čase [1]

Světová produkce polymerů se roku 2015 vyšplhala až na 288 miliónů tun. Z toho 57 miliónů tun bylo vyrobeno v Evropě. Ukázka využití polymerů pro jednotlivá odvětví v průmyslu pro rok 2003 je znázorněna na obr. 2. V dnešní době využití polymerů neustále expanduje, zejména v odvětví stavebnictví, automobilovém průmyslu a elektronice.

Z hlediska ekologičnosti se upouští od polymerních obalů nebo je zde alespoň určitá snaha o náhradu za jiné lépe recyklovatelné materiály, které by neznečišťovaly přírodu svou nerozložitelností. Recyklace polymerních materiálu zůstává stále výzvou a v dnešní době na ní bohužel neznáme globální odpověď. [2]



Obrázek 2: Spotřeba polymerů z hlediska průmyslů (rok 2003) [2]

3 Polymerní materiály

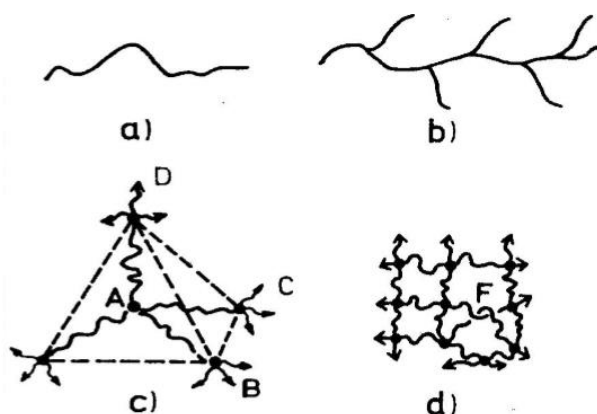
3.1 Struktura

K obecnému popsání polymerů je nutné si nejprve představit, jak taková makromolekula respektive polymer vypadá a z čeho se skládá. Polymer je vytvořen poskládáním velkého množství základních monomerních jednotek do opakujícího se řetězce tzv. polymerizací. Páteř řetězce je tvořena zejména atomy uhlíku s možným výskytem kyslíku, křemíku a dusíku. Vlastnosti každého polymeru jsou dány tvarem a velikostí makromolekuly.

3.2 Tvar

Z hlediska tvaru se makromolekuly dělí na tři skupiny. První skupinou je skupina lineární specifická pospojováním monomerních jednotek s dvěma funkčními skupinami, které vzniknou rozštěpením jedné ze dvou vazeb v monomeru tzv. dvojné vazby. Zjednodušeně si lze první skupinu představit jako nitky nebo šňůru perel. U rozvětvených makromolekul v následující skupině si lze uspořádání představit jako kořeny stromů, jelikož jsou na základním řetězci vázány krátké boční substituenty, které v určité míře blokují jejich pohyblivost. Díky rozvětvení jsou makromolekuly oddáleny. Z toho plyne pokles mechanické pevnosti, tvrdosti a dalších vlastností polymeru. Polymery síťované spadají do třetí skupiny a lze je charakterizovat řetězcem, ve kterém jsou makromolekuly pospojovány mezi sebou vazbami vytvářejícími trojrozměrnou síť. Dominantním představitelem této skupiny jsou kaučuky, kde se síťování nazývá vulkanizací.

[1]



Obrázek 3: Rozdělení tvarů makromolekul – a) lineární, b) rozvětvené, c) ideální síť, d) reálná síť [2]

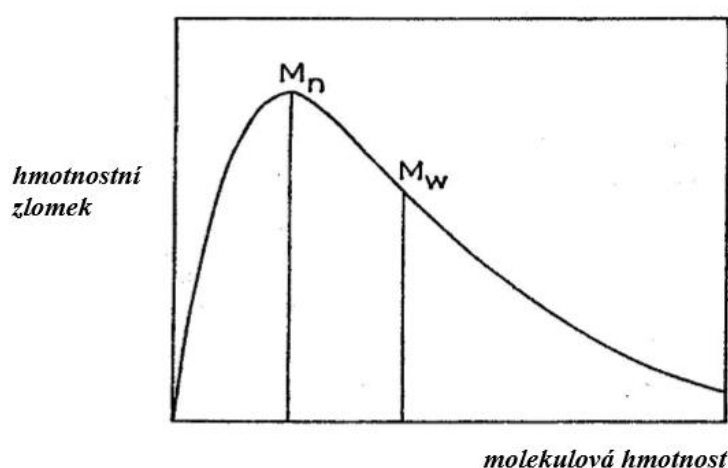
Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru makromolekul

LINEÁRNÍ	ROZVĚTVENÉ	SESÍTOVANÉ
<ul style="list-style-type: none"> ▪ vyšší hustota materiálu ▪ vyšší pevnost ▪ vyšší modul pružnosti ▪ nižší tažnost ▪ vyšší teplotní odolnost ▪ dobrá tekutost taveniny ▪ snadná krystalizace 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nižší hustota materiálu ▪ nižší pevnost ▪ nižší modul pružnosti ▪ vyšší tažnost ▪ nižší teplotní odolnost ▪ nižší tekutost taveniny ▪ nižší schopnost krystalizace 	<p><i>Vlastnosti závisí na hustotě sítě. S vyšší hustotou sítě se materiál vyznačuje zpravidla:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ vysokou pevností ▪ vysokým modulem pružnosti ▪ vysokou teplotní odolnosti ▪ velmi nízkou tažností

Obrázek 4: Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru makromolekul [1]

3.3 Molekulová hmotnost

Vysoká molekulová hmotnost, kterou jsou polymery specifické rozhoduje o jejich vlastnostech. Z hlediska mechanické pevnosti je nutné, aby polymerační stupeň (počet merů v makromolekule) nabýval hodnot v rozmezí od 40 do 80 ve spodní hranici. Teprve překročením této hranice se polymer stává konstrukčně využitelným. Pokud se délka makromolekulárního řetězce (frakce) zvětší, dochází k výraznému nárůstu mechanické pevnosti. Důležitou skutečností je fakt, že řetězce dané makromolekulární látky nejsou stejné, nýbrž se liší délkou. Z tohoto důvodu se distribuce molekulové hmotnosti stanovuje statisticky s následným výpočtem střední hodnoty. Molekulová hmotnost společně s jejím stupněm má vliv především na teplotu měknutí, viskozitu roztoků a tavenin, rozpustnost, pružnost, pevnost a tepelnou stabilitu. Jedná se zejména o odolnostní charakteristiky. Postup výpočtu začíná experimentálním určením M_w (hmotnostně střední molární hmotnost) nebo početně určením M_n (výpočetně střední molární hmotnost), poměr $M_w/M_n = \text{Disperzita}$ (běžné hodnoty 1,5 – 2). [3]

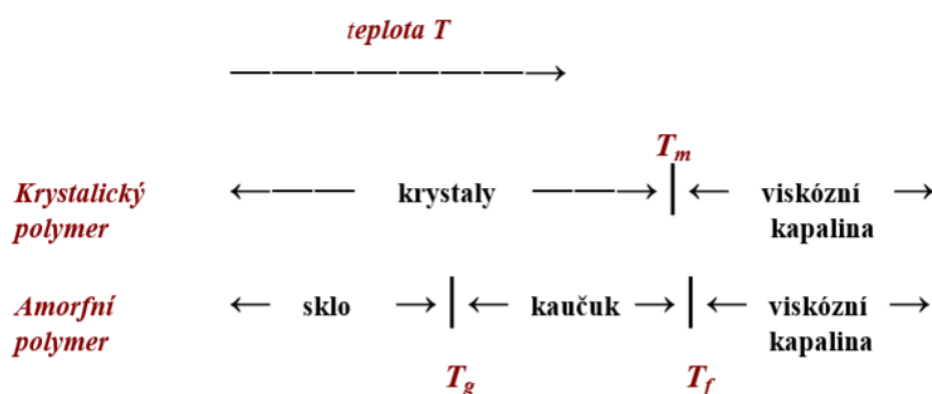


Obrázek 5: Distribuční křivka - M_n = početně střední mol. hm. , M_w = hmotnostně střední mol. hm. [3]

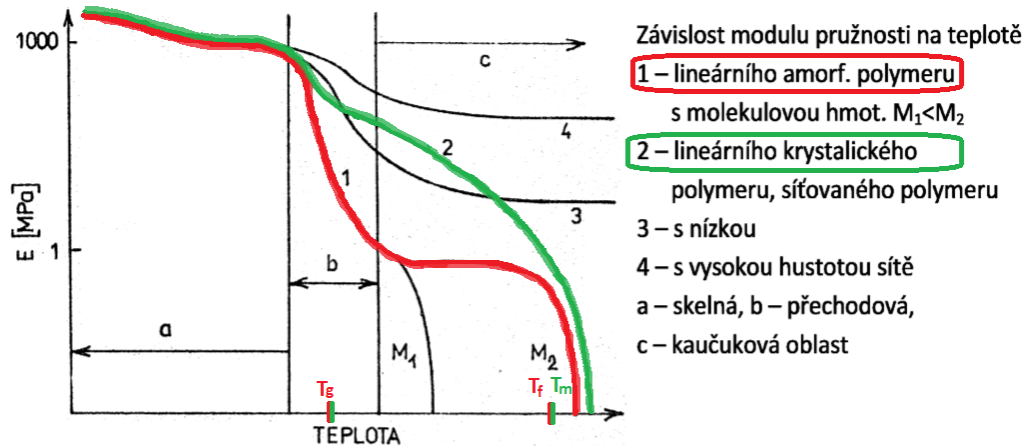
3.4 Fázový stav

Var je fázový přechod polymeru do plynného stavu, respektive se jedná o štěpení větších molekul na menší molekuly (zánik polymeru). Dle pravidelnosti geometrického uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhé fázi se rozlišuje vysoce uspořádaný stav krystalický a poté neuspořádaný stav sklovitý. Důležitým stavem charakterizujícím polymery označujeme stav kaučukovitý obecněji přechodný. Definice přechodného stavu zní ve zjednodušení následujícím způsobem: „Stav kdy se polymer nachází mezi sklovitým a kapalným stavem a lze ho v tomto stavu deformovat malou silou.“ [1]

Existence polymerů lze rozdělit do 4 různých fázových stavů mezi které patří krystalický a dále amorfní rozdělený do tří skupin nazývaných skelný, kaučukovitý a plastický stav. V jakém z těchto stavů se polymer vyskytuje při běžných podmínkách a o šířce teplotního rozmezí, pro který stav platí, rozhoduje zejména molekulová hmotnost makromolekulární látky a chemické složení. [3] Chování amorfního polymeru v závislosti na teplotě má dvě důležitá rozhraní, která jsou pro amorfní polymery charakterizována teplotou zeskenlnění T_g a pro krystalické teplotou tání T_m . Znázornění těchto teplot se udává termomechanickou křivkou, která je závislostí deformace na teplotě za působení vnější konstantní síly. V detailnějším pohledu na grafické znázornění je amorfní polymer pod teplotou T_g ve sklovitém stavu a mezi teplotami T_g a T_f ve stavu kaučukovitém, který je charakterizovaný elastickou deformací. V oblasti plastického toku nad teplotou T_f dochází vlivem působení vnější síly k viskóznímu toku, který je zapříčiněn nevratnými změnami. [2]



Obrázek 6 : Schématické rozdělení fází ve krystalickém a amorfním polymer v závislosti na teplotách specifikovaných výše [2]



Obrázek 7: Termomechanická křivka - závislost modulu pružnosti na teplotě s vyznačenými teplotami specifikovaných výše [3]

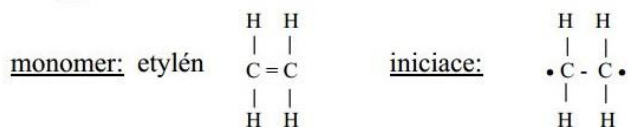
3.5 Syntéza polymerů

Zhotovení syntetických polymerů se uskutečňuje řetězením nízkomolekulárních látek třemi možnými chemickými postupy zvanými polymerace, polyadice a polykondenzace. Jsou to opakující se chemické reakce, kde se nízkomolekulární monomer transformuje na vysokomolekulární látku zvanou polymer. Podmínka proběhnutí reakce spočívá v tom, že monomer v molekule musí obsahovat minimálně dvě reakce schopné funkční skupiny.

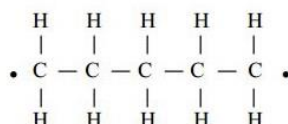
Při polymeraci dochází k přímé reakci malých molekul monomeru. K bližšímu popisu si lze představit rozevření dvojných vazeb monomeru s následným propojením do řetězcové struktury tvořící polymer. Prvním krokem polymerace je nutné rozštěpení násobné vazby v molekule monomeru pomocí reaktivních radikálů značených (R·), případně iontů, které vznikají jako produkty při rozpadu reaktivní látky (I) zvané iniciátor za pomoci tepelné energie či UV záření. Děj se nazývá iniciací a iniciátory mohou být například peroxidy.

Molekula monomeru s vytvořeným radikálem, který je vysoce reaktivní částicí s určitým počtem nepárových elektronů spolu vzápětí reagují, čímž dochází k rozštěpení násobné vazby molekuly za vzniku objemnějšího radikálu, který opět reaguje s další molekulou monomeru. Jev se nazývá propagace a je charakterizován tím, že řetězec narůstá a přitom se na konci rostoucí molekuly opakovaně objevuje volný elektron. Dále může nastat jev zvaný terminace, který představuje ukončení růstu řetězce makromolekuly v důsledku spojení dvou radikálů. Jedná se o zánik aktivních center řetězení. [1]

INICIACE – rozštěpení dvojné vazby, vznik radikálů (obsahují volné elektrony), které rozeběhnou reakci.

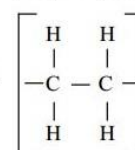


PROPAGACE – růst řetězce, radikál napadá další molekulu, volný elektron se neustále obnovuje na konci rostoucí makromolekuly. Je to exotermická reakce (uvolňuje se teplo).



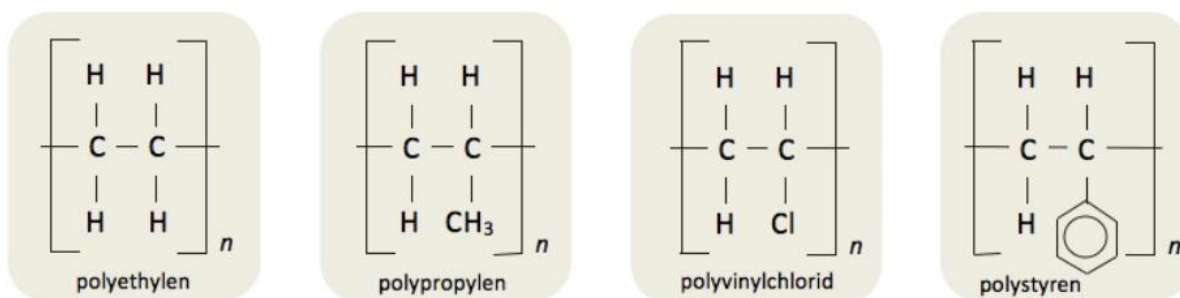
polyethylén

TERMINACE – dokončení reakce, obnovení dvojné vazby.



Obrázek 8: Schématické znázornění Iniclace, propagace, terminace [3]

Jedním z hlavních rozpoznávacích znaků polymerace je ten, že při řetězení nevzniká vedlejší produkt, jelikož se při tvorbě makromolekulárního řetězce využívá kompletní molekula monomeru. Samotná polymerace se dělí do tří podskupin, radikálové, iontové a koordinační. Důležitými produkty polymerace jsou polypropylen, polyvinylchlorid, polyethylen a polystyren.

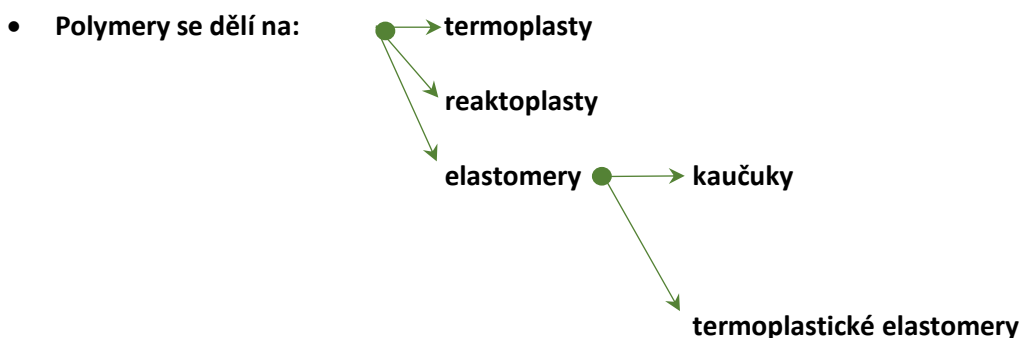


Obrázek 9: Chemické vzorce nejvýznamnějších produktů polymerace [1]

Druhou možností syntézy polymerů se označuje polykondenzace. Jedná se o stupňovitou reakci, kde se molekuly monomerů řetězí do dlouhých řetězců obdobně jako u polymerace s výjimkou vzniku vedlejších produktů odštěpením, ke které u polymerace nedocházelo. Vedlejšími produkty mohou být molekuly vody, které vznikají polykondenzací fenolu a formaldehydu, dále jimi mohou být chlorovodík a amoniak. [1]

Třetím způsobem syntézy polymerů označujeme stupňovitou polyreakci při které, nedochází ke vzniku štěpného produktu a nazývá se polyadice. Reakcí funkčních skupin monomerů je vyvolán charakteristický přesun atomu vodíku z jedné reaktivní skupin na jinou čímž je vyvoláno slučování nebo-li adice. Výsledné složení produktu se od směsi výchozí látky neliší, avšak struktura produktu je od výchozí pozměněna. Polyadici se vyrábějí polyuretany a epoxidové pryskyřice. [2]

3.6 Rozdělení polymerů



Termoplasty a reaktoplasty jsou charakteristické převážně nevratnou (plastickou) deformací za působení vnějšího namáhání, zatímco elastomery patří mezi vysoce elastické materiály s nižší tuhostí.

První skupinou jsou termoplasty. Jedná se o materiály, které při zvýšené teplotě měknou a proto jdou snadno tvářet. Mezní teplota, při které termoplasty přechází do taveniny nebo-li tají se nazývá teplota tání T_m . Pokud se termoplast zpětně ochladí pod tuto teplotu vzápětí opět nabývá tuhé struktury. Proces tuhnutí a měknutí díky, změnám fyzikálního charakteru zůstává vratným. Struktury termoplastů se dělí na amorfni a semikrystalické. Mezi hlavní představitele patří polystyren (PS) a polyvinylchlorid (PVC).

Do druhé skupiny zvané reaktoplasty řadíme materiály se schopností tvarovatelnosti pouze po určitou dobu od ohřátí. Dalším ohříváním či přidáním katalyzátorů jsou vyvolány chemické změny, které vedou k zesíťování molekul což má za následek nerozpustnost a netavitelnost daného reaktoplastu, nezesíťované reaktoplasty jsou pryskyřice. Zesíťování molekul je nevratným procesem zvaným vytržování. Reaktoplasty lze charakterizovat jako materiály s vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí.

Následuje rozdělení elastomerů na kaučuky, které jsou charakteristické dlouhými zapletenými řetězci, amorfni strukturou v nedeformovaném stavu a především nízkou teplotou skelného přechodu T_g s možností řídkého zesíťování zvaného vulkanizace. Zkráceně lze vulkanizaci

definovat jako přechod kaučuků na pryže řídkým zesíťováním. Kaučuk v surovém stavu vykazuje po ohřátí lepivý charakter, který se po ochlazení stane tuhým a nepružným. Zatímco pryž (produkt vulkanizace) je elastická v širokém teplotním rozmezí.

Důležitou skupinou jsou termoplastické elastomery (ve zkratce TPE), které vlastnostmi takřka odpovídají pryžím. Zjednodušeně si lze TPE představit jako směs tvrdých segmentů termoplastů tvořících uzly sítě spolu s měkkými segmenty tvořených elastomery. Odborněji jde o určité množství termoplastického segmentu rozptýleného ve spojitě elastomerní fázi. Důležitým rozdílem mezi pryžemi a TPE je rozdílnost vlastností uzlů sítě. U pryží nabývají chemické povahy u TPE jsou povahy fyzikální. Hlavní výhodou TPE je přechod do tekutého stavu při zvýšené teplotě obdobný jako u termoplastů. Procesem tání ovšem dochází k trvalému snížení elasticity. [1]

3.7 Recyklace a třídění polymerů

Nutností nynější doby se stává efektivní recyklování a co možná nejmenší znečištění životního prostředí. Plastové odpady se dělí na recyklovatelné a obtížně recyklovatelné.

Do skupiny recyklovatelných odpadů spadají zejména obalové materiály jako např. PET láhve, igelitové sáčky a fólie. Z těchto odpadů jsou po recyklování zhotoveny nové užitečné produkty, kterými mohou být tepelné i hlukové izolace (protihlukové stěny), herní prvky na hřiště, nábytek atd.

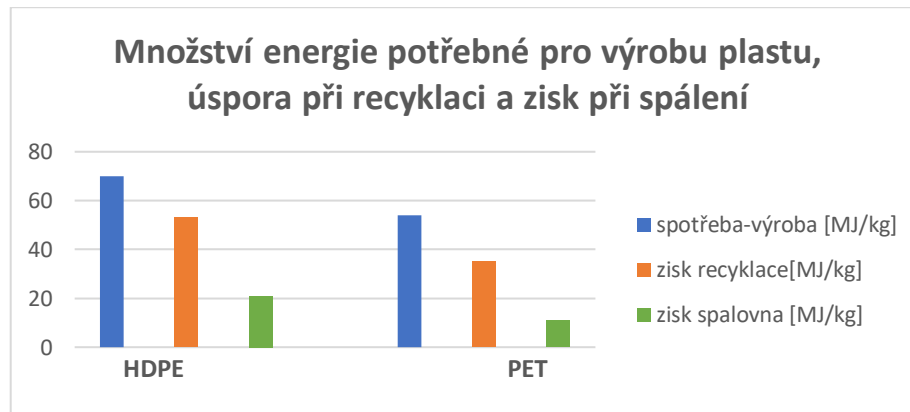
Separace ➡ Dotřídňovací linky ➡ Vytříděná surovina ➡ Recyklát ➡ Nové výrobky

Obrázek 10: Schématický průběh recyklace

Skupina obtížně recyklovatelných až nerecyklovatelných polymerních odpadů je obtížněji popsateľnou kapitolou a proto bude v rámci mé práce probrána pouze povrchově. Mezi obtížně recyklovatelné materiály se řadí vícevrstvé a barevné plasty, obaly, fólie znečištěné od potravin a čistících přípravků. Pokud jsou odpady nerecyklovatelné, využívají se v energetické sféře, kde jsou spalovány. Spalováním plastů obsahujících změkčovadla, barviva a stabilizátory jsou uvolňovány do ovzduší a popelu toxické látky (těžké kovy, ftaláty). Při nedokonalé nastavených spalovacích podmínkách dochází ke vzniku jedovatého oxidu uhelnatého. Z tohoto důvodu je snaha o recyklovatelnost plastů prioritní. [21]

Výhledy evropské strategie do roku 2030 obsahují dva důležité body:

- zajistit recyklovatelnost všech plastových obalů
- snížit spotřebu plastových výrobků na jedno použití na minimum



Obrázek 11: Schématické srovnání energie při výrobě, recyklaci a spalování (HDPE-igelitové sáčky, PET lahve) [18]

4 Nelineární trubice

Nelineární chování materiálu nastává v oblastech velkých deformací, které již nelze popsat pomocí Hookeova zákona, který je použitelný pouze pro malé deformace a pružné (elastické) deformace (po odlehčení vymizí). Vztah mezi napětím a deformací nelze v těchto případech jednoduše definovat. Typickým představitelem nelineárních materiálů je podskupina polymerů zvaná elastomery. Jedná se o viskoelastický materiál, pro který je při harmonickém zatěžování charakteristické fázové opoždění deformace za napětím.

S nelineárními trubicemi se v praxi setkáváme z hlediska biologických materiálů u cév (tepny, žíly, vlásečnice), jícnu a tenkého či tlustého střeva. Další možné trubice z nebiologického materiálu se využívají často jako hadičky v lékařství, automobilech nebo zahradních hadicích.

4.1 Tepny, žíly a kapiláry

Fyziologie cév

Hlavní funkce tepen spočívá v rozvodu krve do celého těla. Z tohoto důvodu je v tepnách řádově vyšší tlak než v žíлах a kapilárách, jelikož k vypuzení krve ze srdce je zapotřebí velké množství kinetické energie, kvůli nutnosti překonání značných odporů. Zaujímají asi 13% z celkového objemu krve.

Žíly odvádějí krev z tkání a orgánů do srdce a v daném časovém okamžiku zaujímají asi 50% z celkového krevního objemu.

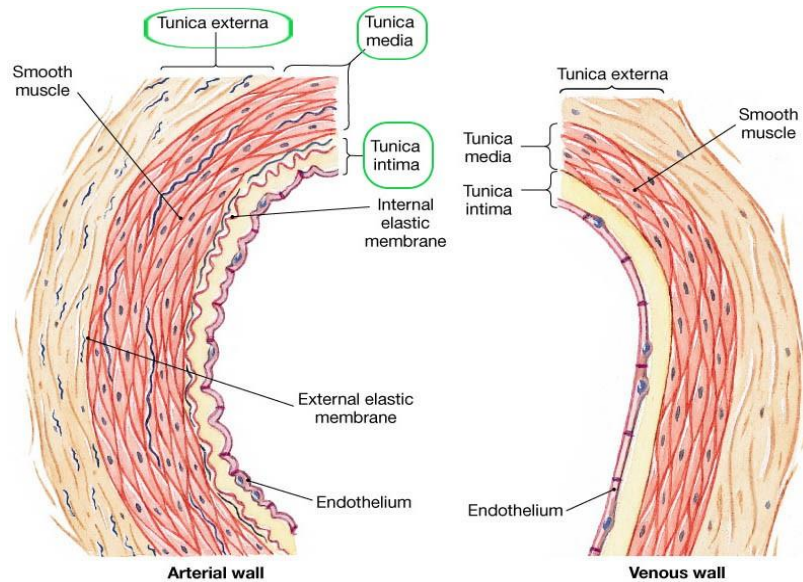
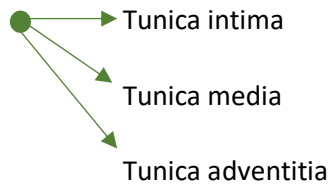
Vlásečnice (kapiláry) tvořící rozsáhlou síť jsou spojením mezi krví a tkání. Proniká jimi kyslík s živinami do tkání a z tkání se zpět do krve dostávají zplodiny látkové přeměny s oxidem uhličitým. [6]

Anatomická stavba

Stěny cév jsou tvořeny vrstvou vazivové tkáně obsahující kolagenní vlákna, přičemž u velkých tepen je stěna obohacena o vrstvu obsahující elastická vlákna s hladkou svalovinou. Malé tepny mají stěny tvořené převážně hladkou svalovinou s malým počtem elastických vláken, zatímco stěny vlásečnic (kapiláry) mají pouze jednu vrstvu plochých výstelkových buněk. Vrstva se nazývá endotel a je charakteristická pro každou cévu jako ta nevnitřnější vrstva.

Stěna se dělí do tří vrstev :

(každá má odlišné vlastnosti)



Obrázek 12: Schématické zobrazení strukturální nehomogenity ve stěně tepny a žíly [4]

Tunica intima

Nejvnitřnější vrstva tvořena podlouhlými polygonálními buňkami endothelu s orientací ve směru toku krve na nichž je subendotelová vazivová vrstvička navazující na elastickou membránu, která se skládá z elastických a kolagenních vláken.

Tunica media

Tepenná vrstva o největší tloušťce tvořena hladkou svalovinou a mezibuněčnou hmotou obsahující proteoglykany a elastická a kolagenní vlákna. Od vnitřní vrstvy se odlišuje orientací vláken i barevným zbarvením.

Tunica adventitia (externa)

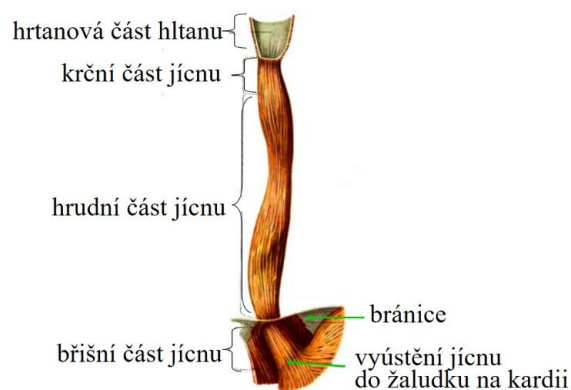
Vnější vrstva cév tvořena vazivem obsahujícím fibroblasty, proteoglykany, podélně orientovaná elastická a kolagenní vlákna, nervová vlákna a vasa vasorum (cévy cévních stěn). [5]

4.2 Trávicí ústrojí

Jícen

Jícen je svalová trubice spojující žaludek a hltan, za účelu transportu potravy a sekretů. Délka jícnu se pohybuje kolem 23-28 cm a průměr v klidovém stavu je přibližně 1,5 cm. Umístění jícnu ve střední části krční dutiny se obecně popisuje začátkem ve výši 6.-7. (Th1) krčního obratle (C6) s naléhavostí na páteř a umístěním více v levo ve spojení s hrtanem a průdušnicí. Ze stran je obklopen laloky štítné žlázy, velkými krčními cévami a v zadní části ho kryje krční páteř. Nejdelší část jícnu se nachází v hrudníku od Th1 do Th7(8), přičemž nejkratší část se vyskytuje v části břišní ve výši Th9-11 (Th11 = jedenáctý obratel hrudní části páteře). Z anatomického pohledu je v horní části stěna jícnu příčně pruhovanou svalovinou z důvodu rychlého procházení sousta. Stěna v dolní respektive břišní části přechází do hladké svaloviny.

Svalovina jícnu má specifickou kinematiku, která se nazývá peristaltické pohyby. Účelem těchto pohybů je aktivní procházení sousta, které je posunováno opakovaným smršťováním svaloviny podmíněným polykacím reflexem. Jícen se stavbou a strukturou od zbytku trávicí trubice výrazně liší především sliznicí, která je zároveň nejpevnější vrstvou stěny jícnu. Další výrazný rozdíl spočívá v absenci serózy, jelikož nepříznivě ovlivňuje technickou náročnost operace. [7]



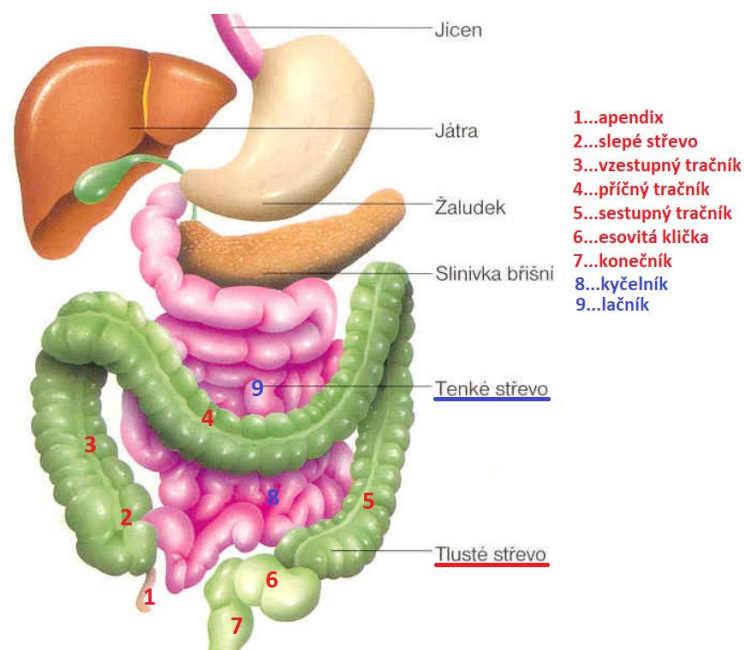
Obrázek 12: Struktura jícnu a jeho rozdělení [7]

Tenké a tlusté střevo

Tenké střevo je nejdelší částí trávicí soustavy o délce kolem 4 až 7 m nacházející se v dutině břišní mezi žaludkem a tlustým střevem. Dochází v něm ke konečné fázi trávení a především ke vstřebávání živin jako jsou například cukry, bílkoviny, vitamíny a tuky, které jsou odváděny krevními a mízními cévami. Na vnitřní vrstvě jsou výběžky zvané klky, které zvětšují slizniční vstřebávací plochu.

Rozděluje se na dvanáctník, lačník a kyčelník. Ve dvanáctníku dlouhém zhruba 30 cm je společný vývod slinivky břišní a žlučového. Lačník je střední a zároveň nejdelší částí tenkého střeva tvořící kličky. Trávení napomáhají peristaltické pohyby, které natrávenou směs promíchávají a posunují směrem dál. Poslední částí je kyčelník, který je nejkratší částí a plynně navazuje na lačník s rozdílem, že jeho kličky jsou uspořádány více vpravo. Jeho vývod ústí do tlustého střeva.

Tlusté střevo je konečným úsekem trávicího ústrojí navazujícím na tenké střevo. Zjednodušeně se jedná o širokou trubici. Funkce tlustého střeva je skladování nestrávených zbytků a formování stolice (defekce) na které se podílí především symbiotické bakterie tvořící střevní mikroflóru. Hlen vylučovaný sliznicí dále chrání její povrch a obaluje nestrávené zbytky. Dělí se na dvě části, které se nazývají tračník a konečník. Tračník se dále dělí na vzestupný, příčný, sestupný a na esovitou kličku. Konečník je koncovou částí trávicího ústrojí hromadící výkaly. [7]



Obrázek 13: Trávicí ústrojí, tenké a tlusté střevo [8]

4.3 Silikonové hadičky v lékařství

Vyskytují se jako části lékařských přístrojů a nebo se v lékařství používají hadičky, které jsou určeny především pro odvádění tekutiny z operovaného místa (při vyjmutí apendixu, plastice vazů atd.). Hadičky se zavádějí do těla pomocí kanyly.

Umělé cévní náhrady patří mezi další skupinu nelineárních polymerních trubic. Obzvláště na ně jsou kladeny velmi přísné nároky, z kterých vyplývá experimentální výzkum v oboru biomechaniky, kde se na cévy pohlíží z inženýrského hlediska. Z mechanických vlastností je zkoumána především pružnost a pevnost materiálu použitého na náhradu, jelikož jsou to nejdůležitější fyzikální vlastnosti zdravých tepen. Vhodný materiál pro cévní náhrady je polyetylentereftalát (PET, PETE, PES) z něhož se vláknité modifikace vyrábějí. [9]



Obrázek 14: Vlevo (1.) se nachází nosní kanyla [12], vpravo (2.) pletená cévní náhrada s kolagenem [11]

4.4 Hadičky v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu se nelineární trubice objevují poměrně často. Ať už jde o palivové hadičky nebo o hadičky do ostřikovačů, každá z těchto skupin musí mít odlišné vlastnosti. Palivové hadice mají větší průměry (8 mm) a ve většině případů se vyrábějí z pružného PVC materiálu, do kterého se přidávají určité přísady zvyšující odolnost vůči olejovitým látkám. Musí být pevnější kvůli vyššímu provoznímu tlaku a proto se vyztužují textilním spirálovým opletem. Hadičky do odstřikovače se liší akorát absencí opletu a velikostí průměru. Oplet se zde nepoužívá kvůli nároku na vysokou pružnost hadiček. Dostatečná pružnost hadiček zajišťuje výbornou tvarovatelnost a tím zamezuje vznikání zlomů, které by omezovali tok kapaliny. [13]



Obrázek 15: Vlevo (1.) se nachází palivová hadice [14], vpravo (2.) hadička do odstříkovačů [15]

5 Nelineární mechanika

5.1. Deformace

Deformaci si lze představit jako změnu objemu nebo tvaru, která je důsledkem pohybu tělesa. Pojem deformace je kvantitativní míra vyjadřující změny způsobené tímto pohybem. Změny lze obecně popsat pomocí materiálového popisu (tzv. Lagrangeovský) nebo pomocí prostorového popisu (tzv. Eulerovský). Ne každý pohyb tělesa vede k deformaci, těleso se může pohybovat i jako tuhý celek, což ale z hlediska mého tématu není důležité, tudíž to nebude dále rozebíráno. Proto tedy bude pohybem myšleno zdeformování tělesa. Pohyb tělesa je definován jako jednoznačné a vzájemně spojitě zobrazení z počáteční referenční konfigurace v čase $t=0$ do zdeformované konfigurace v obecném čase $t=s$. Z čerpané literatury zanechám konvenci, kde jsou velkými písmeny označeny hodnoty vázané ke stavu nezdeformovanému (referenčnímu) a malými písmeny je označován stav po deformaci.

Je-li definován trojrozměrný geometrický prostor ve kterém se nachází nezdeformované těleso obsahující vektorovou bázi popsanou ortonormálními bázovými vektory $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3$. Je možné určení souřadnic jakéhokoliv bodu s následným zaměřením bodu pomocí polohových vektorů \mathbf{X} . Těleso jenž se v důsledku silového působení deformuje, přechází do zdeformované konfigurace, pro kterou existuje další geometrický prostor vymezený ortonormálními bázovými vektory $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ v kterém lze body zaměřit polohovými vektory \mathbf{x} . [17]

5.1.2 Deformační gradient

Infinitesimální změna v prostoru způsobená pohybem mezi výše definovanými konfiguracemi se nazývá deformačním gradientem. Deformační gradient \mathbf{F} je tenzorem druhého řádu vystihující lokální vlastnosti pohybu tělesa zapsán rovnicí ve tvaru

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, t) = \frac{\partial \mathbf{x}(\mathbf{X}, t)}{\partial \mathbf{X}}, \quad (5.1)$$

kde $d\mathbf{x}$, $d\mathbf{X}$ jsou elementární vektory vymežující elementární okolí bodu zaměřeného vektory \mathbf{x} , \mathbf{X} .

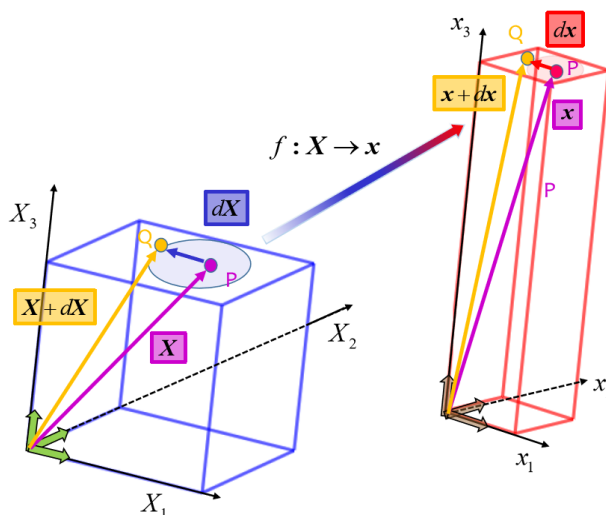
Výstižnější zápis deformačního gradientu jakožto zobrazení je popsán rovnicí (5.2), která převádí diferenciální element referenční konfigurace $d\mathbf{X}$ na diferenciální element průběžné konfigurace $d\mathbf{x}$.

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F}d\mathbf{X}, \quad (5.2)$$

V maticovém tvaru vypadá zobrazení mezi prostory následovně

$$\begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX_1 \\ dX_2 \\ dX_3 \end{pmatrix}. \quad (5.3)$$

Deformační gradient má 9 nezávislých složek obsahujících informace o pohybu kontinua v bodě. Informace charakterizuje element jako tuhý celek z hlediska rotace a protažení („strečů“). Pro vyjádření čisté deformace nebo rotace se využívá polárního rozkladu. [17]



Obrázek 16: Zobrazení referenčního (vlevo) a deformovaného stavu (vpravo) [16]

5.1.3 Zavedení válcových souřadnic

Matematický model válcové elastomerní trubice bude vystavěn na základě nafukování a protahování. Vztahy mezi **válcovými souřadnicemi** $\mathbf{X} = (R, \theta, Z)$ a **kartézskými souřadnicemi** $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)$ jsou popsány rovnicemi (5.4) a (5.5).

$$(X_1, X_2, X_3) = (R \cos(\theta), R \sin(\theta), Z) \quad (5.4)$$

respektive

$$(R, \theta, Z) = \left(\sqrt{X_1^2 + X_2^2}, \arctg\left(\frac{X_2}{X_1}\right), X_3 \right) \quad (5.5)$$

Dále budeme pracovat s vektory $\mathbf{E}_R, \mathbf{E}_z, \mathbf{E}_\theta$, v ortonormální bázi a tak pro polohový vektor bude platit rovnice (5.6).

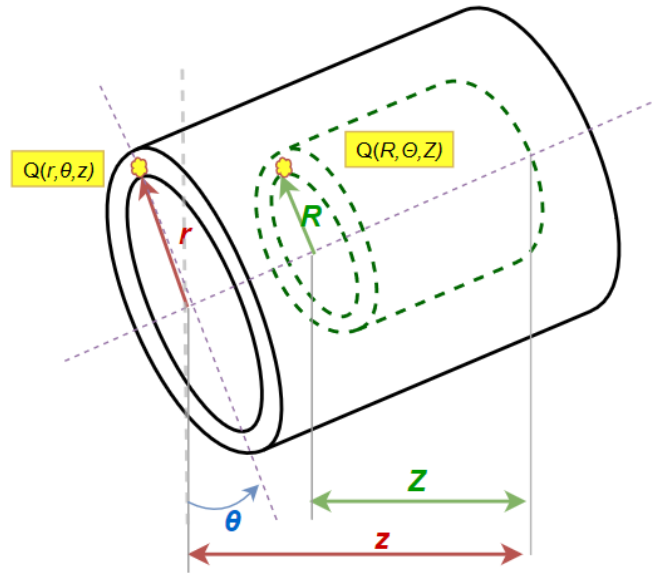
$$\mathbf{X} = R \cdot \cos(\theta) \mathbf{E}_1 + R \cdot \sin(\theta) \mathbf{E}_2 + Z \cdot \mathbf{E}_3 = R \cdot \mathbf{E}_R(\theta) + Z \cdot \mathbf{E}_Z \quad (5.6)$$

Vztah mezi bázovými vektory je popsán následujícími rovnicemi (5.7), (5.8), (5.9).

$$\mathbf{E}_R = \cos(\theta) \mathbf{E}_1 + \sin(\theta) \mathbf{E}_2 \quad (5.7)$$

$$E_\theta = -\sin(\theta)E_1 + \cos(\theta)E_2 \quad (5.8)$$

$$E_Z = E_3 \quad (5.9)$$



Obrázek 17: Válcová trubice před deformací (čárkovaná - zelená) a po deformaci (plná - černá); materiálová částice Q přechází z (R, Θ, Z) na (r, ϑ, z) ; R je označení radiální souřadnice, Z délkové souřadnice a Θ úhlové souřadnice.

Pokud označíme H resp. h tloušťkou stěny trubice v nezdeformovaném resp. zdeformovaném stavu. Lze vztahy mezi zdeformovanou a nezdeformovanou trubicí vyjádřit rovnicemi (5.10), (5.11), (5.12), kde λ značí streč v příslušném směru.

$$h = \lambda_{rR} \cdot H \quad (5.10)$$

$$r = \lambda_{\theta\theta} \cdot R \quad (5.11)$$

$$z = \lambda_{zZ} \cdot Z \quad (5.12)$$

Princip výpočtu deformačního gradientu přesahuje znalosti bakalářského studia a proto uvedu výsledné vztahy, které jsem převzal ze skript: Patobiomechanika srdečněcévního systému I. Díl [17].

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial r}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial r}{\partial \theta} & \frac{\partial r}{\partial Z} \\ r \frac{\partial \theta}{\partial R} & \frac{r}{R} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} & r \frac{\partial \theta}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

K matematickému popisu mého případu není zapotřebí všech devíti složek, jelikož bylo bráno v potaz pouze nafukování trubice $R \rightarrow r$ a axiální prodloužení $Z \rightarrow z$.

Během nafukování trubice nedochází k žádnému zkřutu a proto lze psát $\Theta = \theta$. To vede k závěru, že platí $\frac{\partial \theta}{\partial \theta} = 1$ a proto lze psát $\lambda_{\theta\theta} = \frac{r}{R} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} = \frac{r}{R}$. Předpoklad tenkostěnné nádoby výsledný

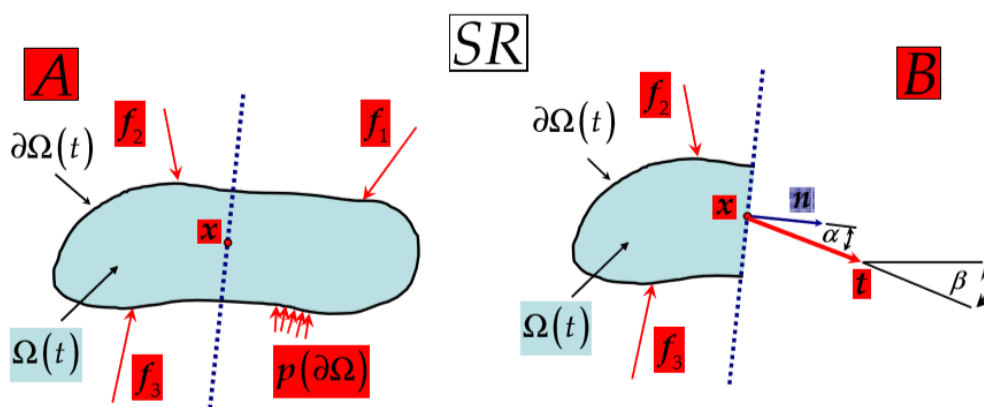
vztah zjednoduší jelikož platí: $\frac{\partial r}{\partial R} = \frac{h}{H}$. V neposlední řadě zanedbáme přítomnost zkosů. Zjednodušením dostáváme vztah (5.14).

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \lambda_{rR} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{zZ} \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

5.2 Napjatost

Nechť existuje těleso A, které se v čase t nachází v konfiguraci $\Omega(t)$, kde je vystaveno vnějšímu silovému zatížení a splňuje podmínky statické rovnováhy. Těleso rozříznu fiktivním řezem pomoví libovolné roviny na dvě části. Rozdělením tělesa na dvě části je ztracena část silového působení a tak i rovnováha. Z tohoto důvodu je nutné v místě řezu nahradit oddělenou část výsledným silovým účinkem, který před rozdělením mezi danými částmi působil.

Zaměříme-li se na libovolný konkrétní bod x roviny řezu, která má vnější normálový vektor \mathbf{n} . Do bodu x je nutné vložit silovou výslednici $d\mathbf{f}$, aby byla zajištěna statická rovnováha. K silovému vektoru $d\mathbf{f}$ se zavádí vektor (plošné) intenzity vnitřních sil \mathbf{t} (tzn. Cauchyův) tak, aby v elementárním plošném okolí ds bodu x myšleného řezu vytvářel staticky ekvivalentní silové působení $d\mathbf{f} = \mathbf{t}ds$.



Obrázek 18: Metoda řezu na tělese ve statické rovnováze (SR) a vektory intenzity vnitřních sil. A – zdeformovaná konfigurace $\Omega(t)$ a její hranice $\partial\Omega(t)$ s naznačeným silovým působením a myšleným řezem obsahujícím bod x . B – po uvolnění části tělesa s doplněním skutečného vektoru intenzity vnitřních sil \mathbf{t} , zajišťujícím rovnováhu. [17]

5.2.1 Tenzor napětí

„Nechť vektor intenzity vnitřních sil \mathbf{t} získáme lineární transformací $\boldsymbol{\sigma}$ normálového vektoru \mathbf{n} . V takovém případě nazýváme lineární transformaci $\boldsymbol{\sigma}$ tenzorem Cauchyova (skutečného) napětí.“ [17]

$$\mathbf{t} = (x, t, \mathbf{n}) = \boldsymbol{\sigma} (x, t) \mathbf{n} \quad (5.15)$$

Rovnice vypovídá o tom, že vektor intenzity vnitřních sil závisí pouze na poloze, čase a úhlu pod jakým těleso rozřízneme.

Jedná se o tenzor 2. řádu, jehož složky lze získat projekcí podél bázových vektorů \mathbf{e}_i , kde pomocí vztahu ($\mathbf{t}_1 = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{e}_1$) získáme vyjádření:

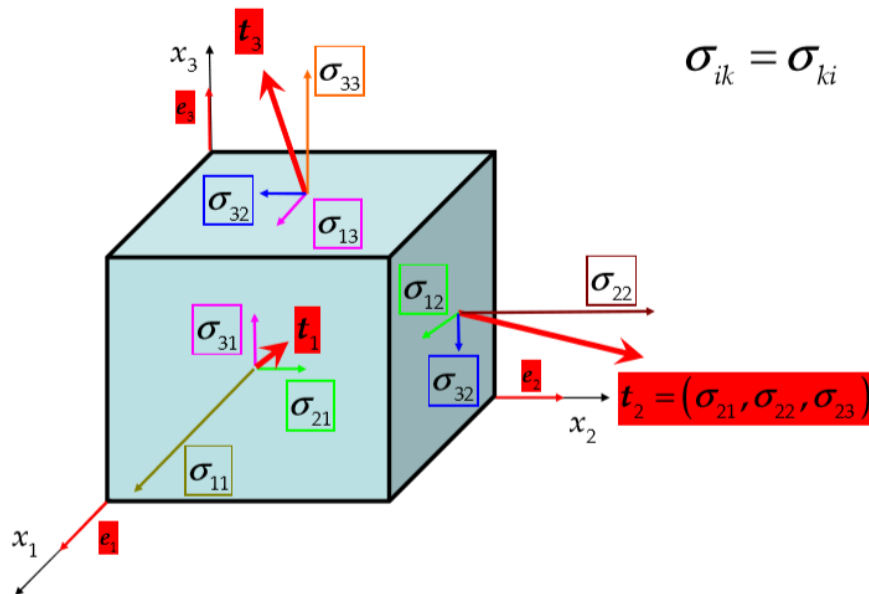
$$\mathbf{t}_1 = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{21} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{t}_2 = \sigma_{12} \mathbf{e}_1 + \sigma_{22} \mathbf{e}_2 + \sigma_{32} \mathbf{e}_3 \quad (5.17)$$

$$\mathbf{t}_3 = \sigma_{13} \mathbf{e}_1 + \sigma_{23} \mathbf{e}_2 + \sigma_{33} \mathbf{e}_3 \quad (5.18)$$

Diagonální složky σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) nazýváme normálová napětí a mimodiagonální složky σ_{ij} ($i \neq j$) smyková napětí.

$$\mathbf{t} = (\mathbf{t}_1; \mathbf{t}_2; \mathbf{t}_3) = (\sigma_{11} + \sigma_{21} + \sigma_{31}; \sigma_{12} + \sigma_{22} + \sigma_{32}; \sigma_{13} + \sigma_{23} + \sigma_{33}) \quad (5.19)$$



Obrázek 19: Složky tenzoru $\boldsymbol{\sigma}$ a vektory skutečné intenzity vnitřních sil [17]

6 Experimentální metody použité pro zjišťování mechanických vlastností polymerů

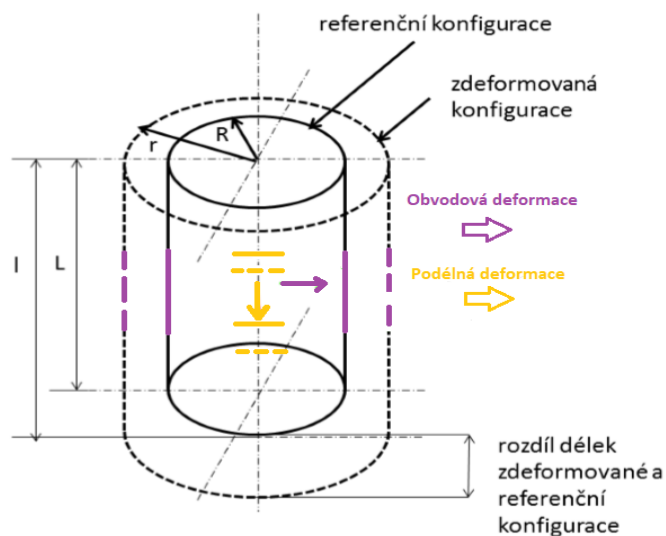
6.1 Inflačně - extenzní experiment

Z názvu experimentu plyne, že testovaný vzorek válcového tvaru je natahován a nafukován. Extenze se uskutečňuje přidáním axiálního závaží a nafukování je zajištěno přívodem kapaliny do vnitřní dutiny trubice (tlakování). Obvodové a axiální deformace vzorku jsou určeny na základě videozáznamu ze dvou kamer uspořádaných pod určitých úhlem. Tento experiment se používá zejména díky vhodné simulaci pohybu stěny aorty během srdečního cyklu. Přesnost určení mechanických vlastností z tohoto testu je na úkor obtížnosti jeho provedení. Z důvodu nestandardizovaných protokolů a tlakování vzorků pro různá axiální zatížení.

Mnou zpracovaná data z experimentálního měření byla naměřena právě pomocí tohoto typu experimentu, proto mi přišlo vhodné se podrobněji zabývat tím, jak samotný experiment probíhal. Jelikož mnohé anomálie vyskytující se v datech jsou bez znalosti experimentu takřka nemožné identifikovat.

6.1.1 Tubulární vzorek

K získání mechanické odezvy stěny tubulárního vzorku při cyklickém zatěžování se používá extenzně-inflační test. Test probíhá zatěžováním vzorku v podélném i obvodovém směru. V podélném směru je zatížení uskutečněno přidáním závaží o určité hmotnosti, která byla pro mnou zpracovávaná data nastavena na 0g, 250g, 500g, 750g a 1000g. Zatížení v obvodovém směru se realizuje pomocí natlakování trubice, kde je dosaženo maximálního tlaku 28 kPa. Tlakování je realizováno zdvihem pístu. Z dříve provedených experimentů se jako nejefektivnější způsob monitorování deformace osvědčila soustava dvou kamer rozmístěných pod úhlem 90°.



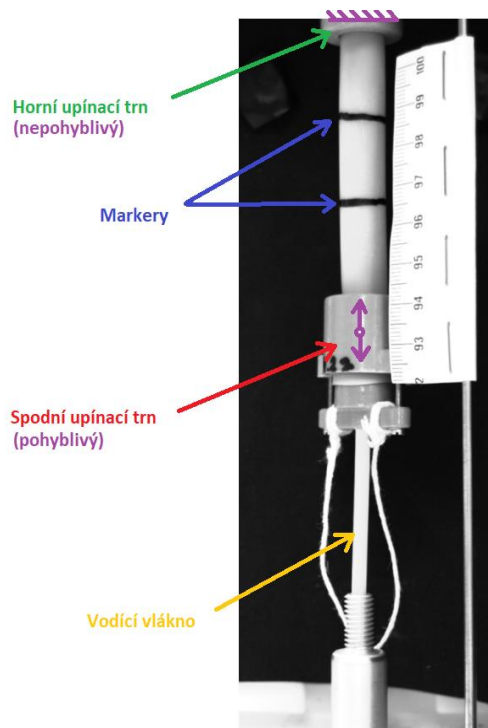
Obrázek 20: Schématické zobrazení deformování tubulárního vzorku během inflačně-extenzivního testu (malá písmena značí stav po zdeformování)

6.1.2 Měření vzorků

Nejdříve je nutné proměřit testované vzorky a následně určit jejich referenční rozměry. Měření by mělo být prováděno jednou osobou.

6.1.3 Průběh experimentu

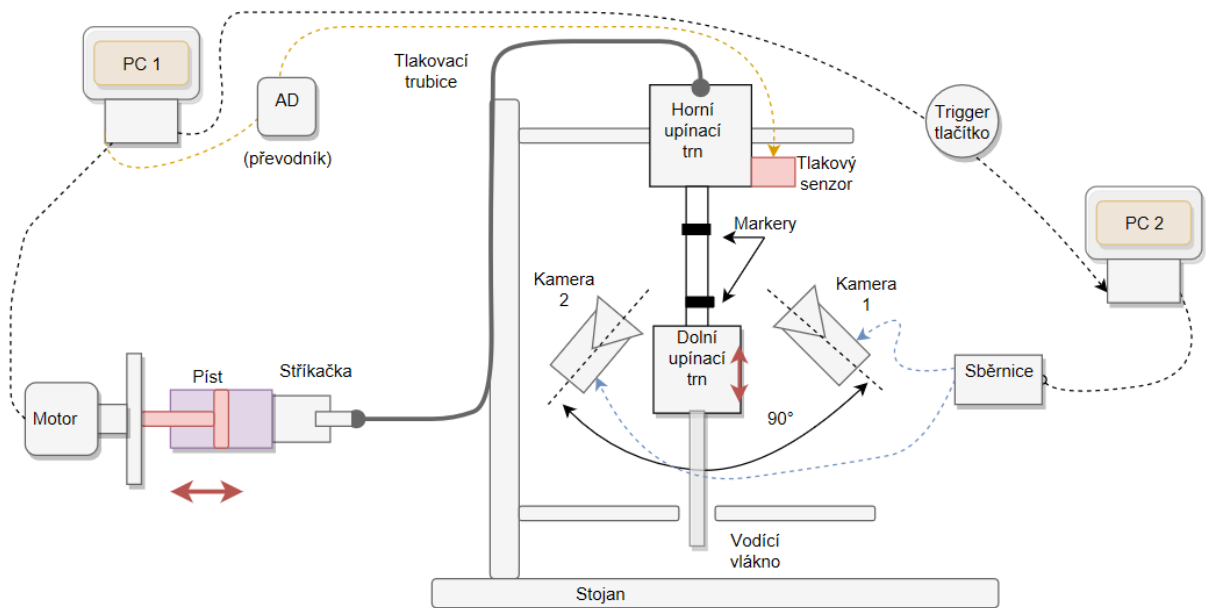
Proměřené vzorky byly upnuty mezi upínací trny. Na horní nepohyblivý upínací trn byl připevněn tlakový senzor. Dále do něj byla přivedena hadička ze stříkačky, kterou poháněl lineární motor s konstantním zdvihem pístu řízený počítačem 1. Hadičkou byla vtlačena kapalina za účelem radiálního namáhání stěn trubice. Před procesem zavodňování trubice byla důležitým parametrem samotného měření absence vzduchu v měřeném vzorku a kterémkoliv místě měřicího systému, jelikož by vzduch, který je stlačitelný, vnesl do měření chybu. Před měřením bylo vždy provedeno několik cvičně zatěžovacích cyklů měřeného vzorku. Pomocí těchto cyklů byla zjištěna závislost mezi posuvem pístu a velikostí tlaku, kterou daný posuv způsobuje. Spodní upínací trn byl realizován jako axiálně volný s možností natočení kolem axiální osy.



Obrázek 21: Fotografie zkušebního vzorku s názorným popisem

Po upnutí vzorku na něm byly vyznačeny dva černé pruhy (markery), sloužící k identifikování prodloužení. Krok lineárního motoru je spolu s rychlostí posuvu příčnicku a velikostí zdvihu stříkačky (tj. absolutní vzdálenosti pro horní a dolní úvrať lineárního motoru) přesně definován. Záznam obrazu je realizován dvěma vysokofrekvenčními kamerami, které slouží jako videoextenzometry. Kamery byly vůči sobě umístěny pod úhlem 90° a připojeny přes sběrnici k počítači 2. Uspořádání kamer po 90° bylo zvoleno z důvodu, že obvodová deformace není ve všech směrech stejná, jelikož se vzorek zpočátku nedeformuje jako ideální válec. Nejdříve průřez vzorku může připomínat elipsu a při dosažení určitého tlaku přechází v kruhový. Nastavením kamer tímto způsobem se získají dvě obvodové deformace, které se zprůměrují a následně je pro výpočty používána průměrná hodnota.

Mezi počítači je umístěno trigger tlačítko, kterým se po zmáčknutí spustí měření tlaku na měřícím PC1 a zároveň měření obrazu na druhém PC2. K měření obrazu resp. deformací je důležité mít na snímcích z kamer konstantní pozadí a měřící značky (markery). Kamery jsou synchronizovány se snímačem tlaku, tak aby v jeden čas byly získány výstupy ze všech přístrojů najednou.



Obrázek 22: Schéma experimentu

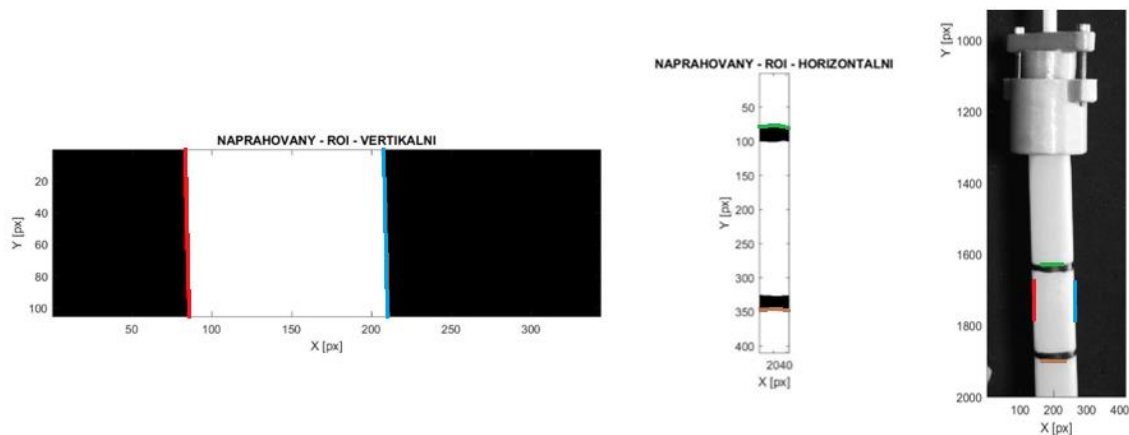
6.1.4 Zpracování dat

Zpracování dat v podobě snímků z kamer proběhlo vybráním oblastí z měřeného vzorku metodou ROI (region of interest) viz. obr.23. Oblasti jsou označené žlutou a fialovou barvou.



Obrázek 23: Vybrání oblastí ROI

V označených oblastech byla provedena detekce hran na rozhraní vzorku s pozadím pro obvodovou deformaci (červená, modrá) a pro deformaci v podélném směru na rozhraní vzorku a vyznačených markerů (zelená, hnědá), viz. obr.24.

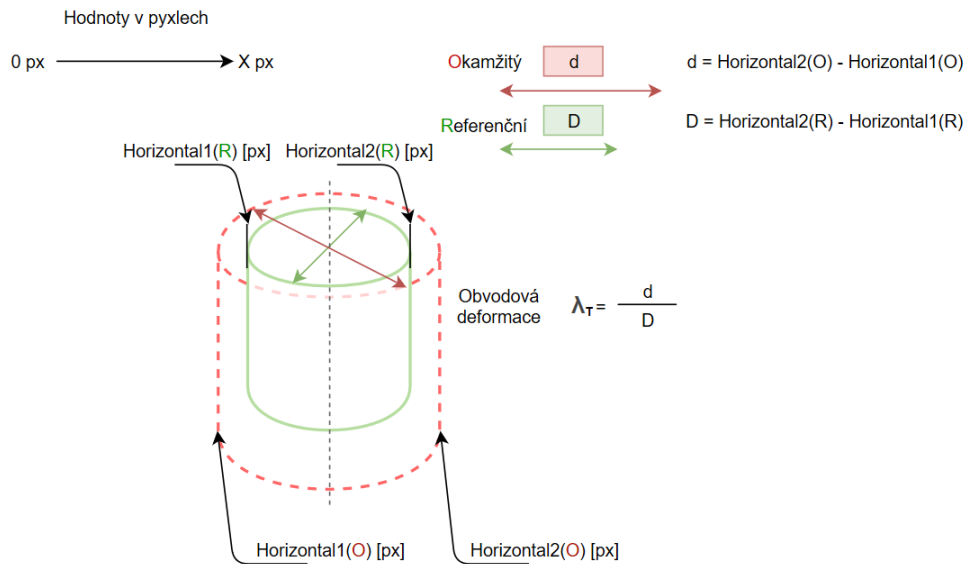


Obrázek 24: Detekce a prahování hran ROI

Deformace v podélném směru byla určena z pohybu vnějších okrajů markerů a obvodová deformace z pohybu obvodových hran trubice. K detekování pohybu jednotlivých hran bylo nutné obraz převést na binární mapu a následné naprahování jednotlivých hran. Výsledky měření jsou závislé na přesném naprahování, kde je nejdříve nutné detekovat okrajové hrany vzorku. Hrany jsou tvořeny rozhraním pixelů bílé a černé barvy, které program rozpozná jako binární hodnoty 0 a 1. Program na základě souřadnicového systému x, y prohledává jednotlivé pixely snímku a ukládá si na jaké pozici se 1 nebo 0 nachází. Pro obvodovou hranu označenou červenou barvou viz. obr. 22 program začíná v levém horním rohu ze souřadnice $x = y = 0$. Postupně prochází binární mapu ve směru osy x a jakmile narazí na bílou barvu, vrátí se na souřadnici $x = 0$ a $y=1$ a postup opakuje. Program tímto postupem projde binární mapu až na konec osy y a tím je detekována první hrana. Postup pro prahování zbylých hran je obdobný.

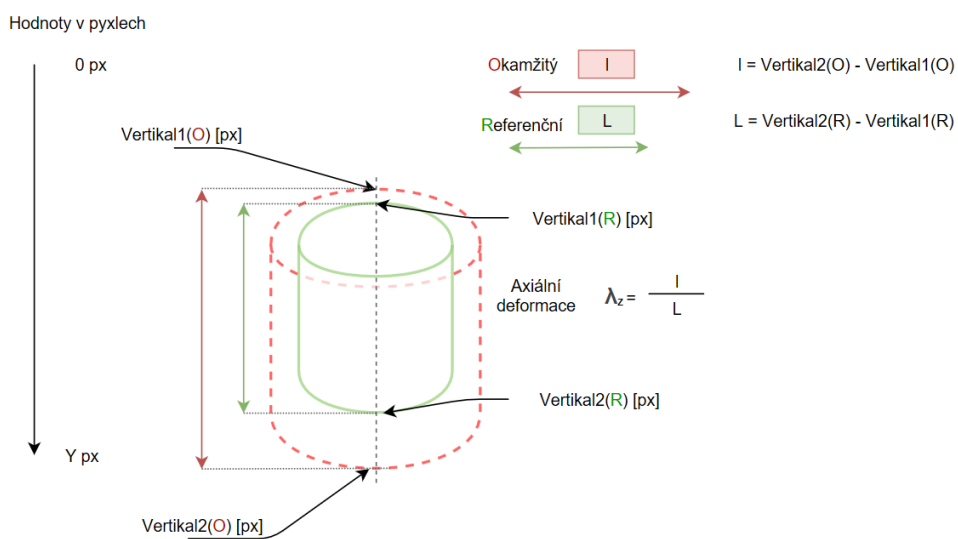
6.1.5 Obvodová a axiální deformace elastomerní trubice

Obvodovou deformaci lze chápat jako změnu průměru dané trubice. Důležité je stanovení referenční hodnoty od které se bude daná deformace posuzovat. Jako referenční hodnoty byla vybrána hodnota z prvního cyklu s tlakem blížícím se k nulové hodnotě. Popis a definice obvodové deformace (viz obr. 25).



Obrázek 25: Schématické znázornění a použitý výpočtový vztah obvodové deformace v elastomerní trubici

Axiální deformace má analogický popis, kde se namísto průměru řeší délka testovaného vzorku.



Obrázek 26: Schématické znázornění a použitý výpočtový vztah axiální (délkové) deformace v elastomerní trubici

6.2 Tahová zkouška polymerů

Patří mezi statické zkoušky. Provedení zkoušky je dáno normami ČSN EN ISO 527-1 a ČSN ISO 527-2. Tahové charakteristiky jsou pro každý materiál jedny z nejzákladnějších mechanických vlastností. Testované těleso je vystaveno jednoosému namáhání v tahu a díky tomu je možné sledovat průběh deformace (poměrného prodloužení) v závislosti na normálovém napětí. Zkušební těleso je natahováno ve směru své podélné osy konstantní rychlostí. Tato závislost se nazývá deformační křivka. Z uvedené závislosti lze určit důležité mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu.

Mezi zkoumané tahové vlastnosti materiálu patří smluvní napětí (σ), *relativní prodloužení* (ε) a modul pružnosti materiálu (E). Určují se ze vztahů:

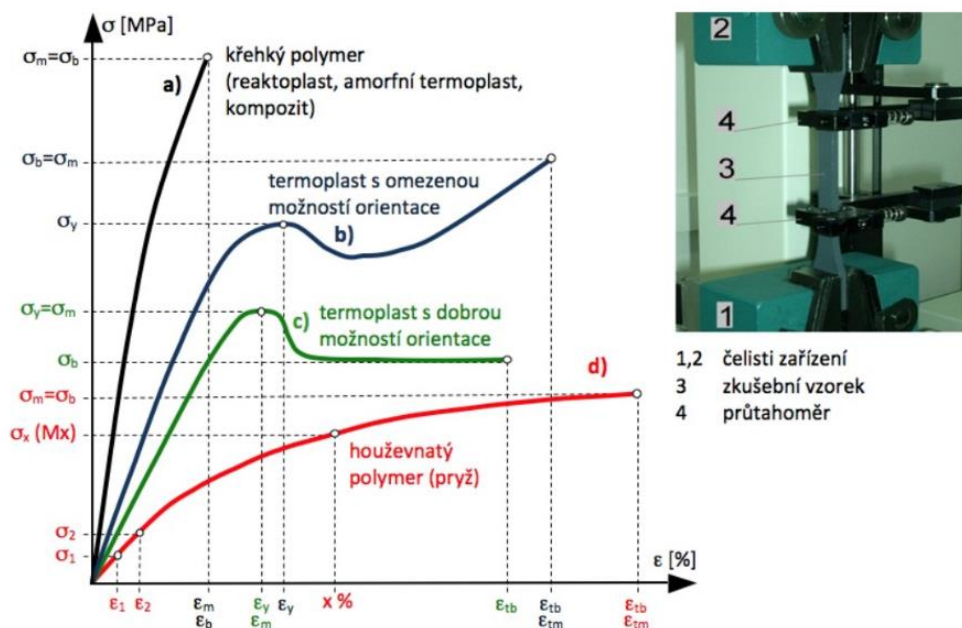
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100[\%], \quad (6.2)$$

kde F je velikost působící síly, S_0 původní průřez zkušebního tělesa, L_0 počáteční délka zkušebního tělesa a ΔL_0 zvětšení počáteční délky.

Hookův zákon (5.3) k výpočtu modulu pružnosti E lze použít pouze pro křehké polymery v oblastech malých deformací. Při stanovení je postup takový, že se určí smluvní hodnota protažení vzorku (100 %, 200 %, 300%) a následně se pro smluvní hodnotu odečte smluvní napětí, kterým je toto prodloužení vyvolané. Smluvní napětí se označuje modulem protažení M100, M200, M300. [1,22]

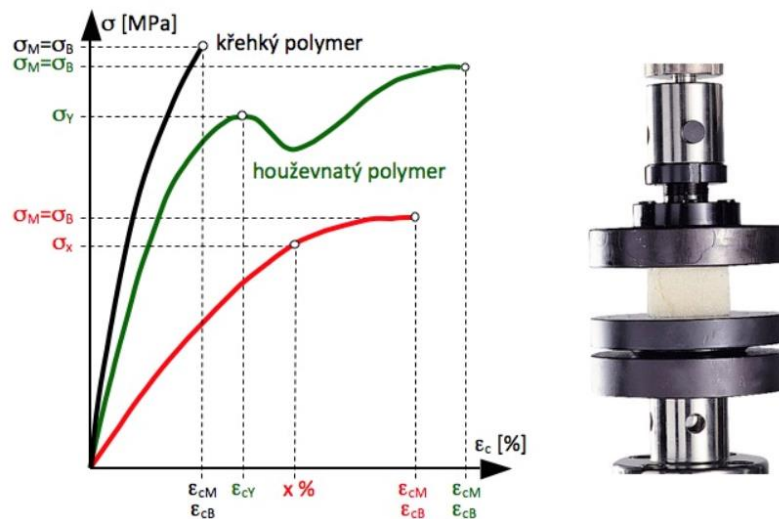
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (6.3)$$



Obrázek 27: Fotografie tahové zkoušky polymerního materiálu (vpravo), grafické zpracování dat naměřených tahovou zkouškou (vlevo), σ_m (mez pevnosti), σ_b (napětí při kterém dojde k přetržení zkušební vzorku) [1]

6.3 Tlaková zkouška polymerů

Patří mezi další statické zkoušky. Správné provedení zkoušky je deklarováno normou ČSN EN ISO 604. U elastomerů je nejčastěji zkušební těleso ve formě válce, trubky nebo pravoúhlého hranolu. Těleso se uloží mezi dvě tlačné desky, kde se během stlačování graficky vykresluje závislost napětí – poměrné stlačení (viz obr. 27). Pro tvrdé a křehké polymery je nárůst napětí rovnoměrný až do dosažení meze pevnosti v tlaku σ_M , kde dochází k destrukci zkušební tělesa ve formě povrchových trhlin. Vznik povrchových trhlin není vždy spjatý s velkými deformacemi a ztrátami povrchové soudržnosti. Průběhy křivek získaných tlakovou zkouškou pro křehké, houževnaté a měkké polymery jsou znázorněny na obr. 27. Postup vyhodnocení mechanických charakteristik je analogický tahové zkoušce s rozdílem, že se veličiny indexují velkými písmeny (např. σ_M, σ_B). [1,22]

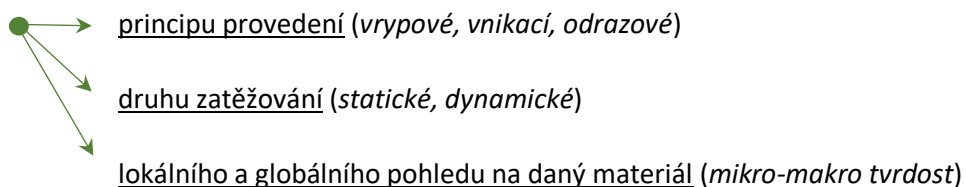


Obrázek 28: Fotografie tlakové zkoušky polymerního materiálu (vpravo), grafické zpracování dat naměřených tlakovou zkouškou (vlevo) [1]

6.4 Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti

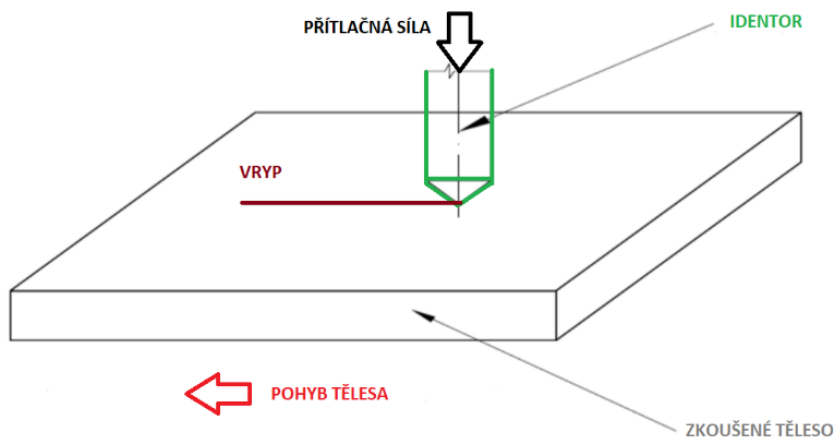
Tvrdość materiálu je definována jako odpor povrchové vrstvy materiálu proti vnikajícímu tělesu.

- Zkoušky tvrdosti dělíme dle:



Vrypová – Martensova zkouška

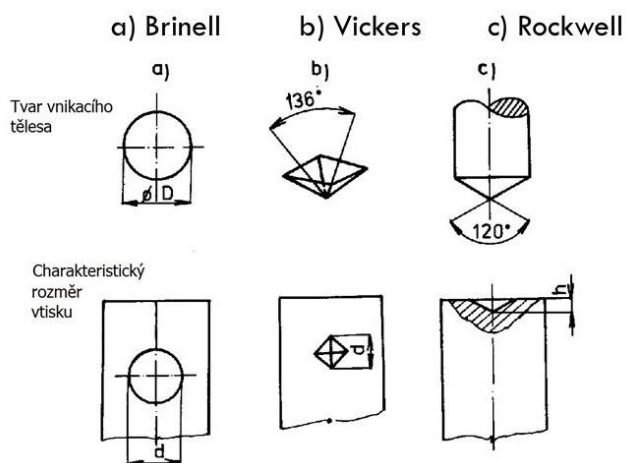
Princip vrypové zkoušky spočívá v tažení diamantového kužele po povrchu zkoušeného materiálu. Síla působící na kužel se postupně zvyšuje. Hodnota tvrdosti je vyjádřena zatížením, které vytvoří vryp o šířce 0,01 m. Tato zkouška není normalizována.



Obrázek 29: Schématické znázornění vrypové zkoušky

Vnikací

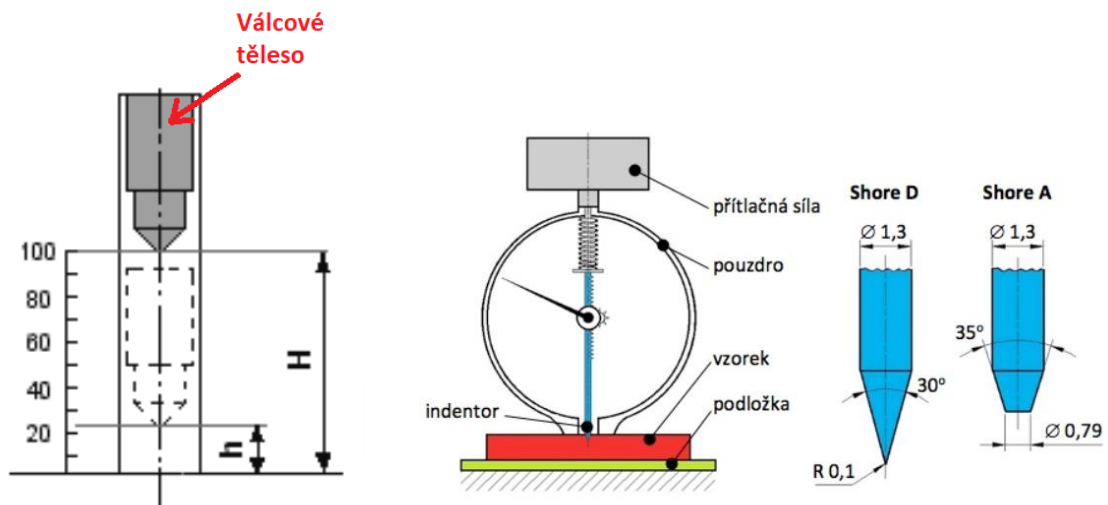
Princip vnikací zkoušky spočívá v zatlačování indentoru do povrchu zkoušeného materiálu. Typ zkoušky je určen tvarem indentoru (*Brinell – kulička, Vickers – jehlan, Rockwell – kužel*). Hodnota tvrdosti se určí z hloubky vtlačení indentoru a je závislá na viskoelasticitě materiálu.



Obrázek 30: Rozdělení vnikacích zkoušek dle tvaru indentoru [22]

Odrazové

Jedná se o dynamickou zkoušku, kde je princip zkoušky založen na odrazu identoru od zkoušeného tělesa. Hodnota tvrdosti se určí z výšky do které se odrazí identor od zkušebního vzorku a je měřena pomocí přístroje, který se nazývá Shoreho skleroskop. Výška odrazu závisí na modulu pružnosti daného materiálu, z tohoto důvodu lze srovnávat pouze materiály s podobnými moduly pružnosti. Skleroskop se skládá z trubky, kde je malé válcové těleso zakončené identorem o určitém tvaru. Válcové těleso se pouští z určité výšky H a následně se ze stupnice odečítá výška odrazu h .

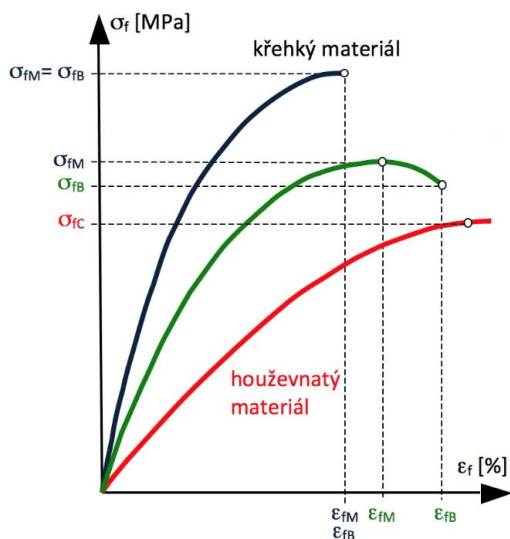


Obrázek 31: Schématické zobrazení Shoreho odrazové zkoušky (vlevo), druhy identoru [1]

6.5 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 178. Jedná se o statickou zkoušku, které se v praxi využívá pouze v ojedinělých případech. Využívá se například k testování svarových spojů. Pro křehké materiály jako jsou například některé polymery se ohybovou zkouškou zjišťuje modul pružnosti. Zkouška se provádí na speciálních strojích (viz obr. 32). Zkoušený vzorek je uložen na dvou podporách mezi kterými je vyvinuta zatěžující síla (tzv. třibodový ohyb). Ohybovou pevnost σ_{fM} lze vypočítat z maximálního ohybového momentu $M_{o,max}$ a průřezového modulu W_o . [1, 23]

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_o} \quad (6.4)$$



Obrázek 32: Fotografie ohybové zkoušky polymerního materiálu (vpravo), grafické zpracování dat naměřených obybovou zkouškou (vlevo) [1]

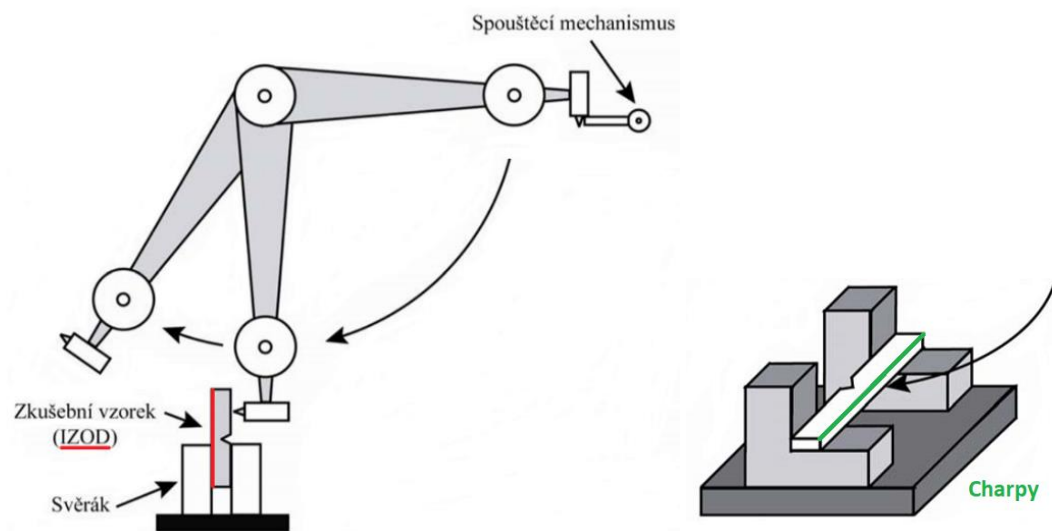
6.6 Rázové zkoušky

Rázová zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 179. Je to dynamická zkouška prováděna za účelem zjištění potřebné práce, kterou musí kladivo vykonat, aby přerazilo zkušební vzorek. Dělí se na dva typy (Charpy - horizontálně, Izod - vertikálně), mezi kterými je rozdíl pouze v poloze zkušebního tělesa (viz obr.28). Zkouška se provádí na speciálních strojích opatřených kyvadlem, či kladivem. Při měření vrubové houževnatosti je těleso opatřeno vrubem ve tvaru písmena „V“. Rázovou zkouškou jsou zjištěny hodnoty rázové houževnatosti bez vrubu a_{cU} a s vrubem a_{cN} .

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h * b} * 10^3 \quad (6.5)$$

$$a_{cN} = \frac{E_N}{h * b_N} * 10^3, \quad (6.6)$$

kde E je kinetická energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa, h je tloušťka zkušebního tělesa v mm, b je šířka zkušebního tělesa v milimetrech. [1, 22, 24]



Obrázek 33: Schématický průběh zkoušky rázovým kladivem [24]

7 Cíle analyzování experimentu

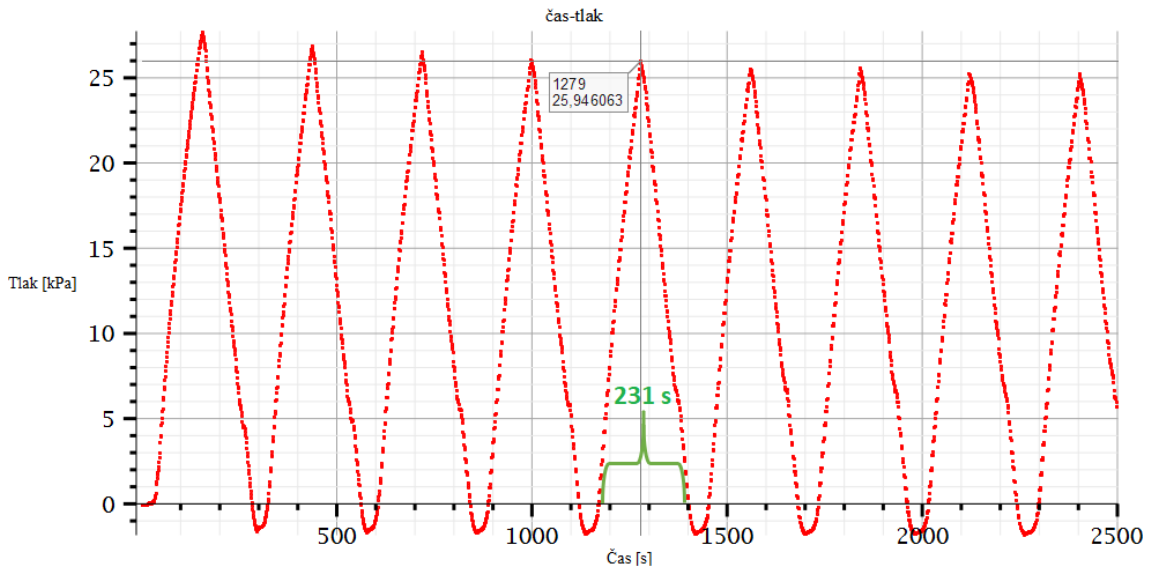
K bližšímu určení mechanického chování elastomerní trubice bude zapotřebí analyzovat naměřená data pomocí programu Maple.

V práci budou ověřeny tyto fenomény:

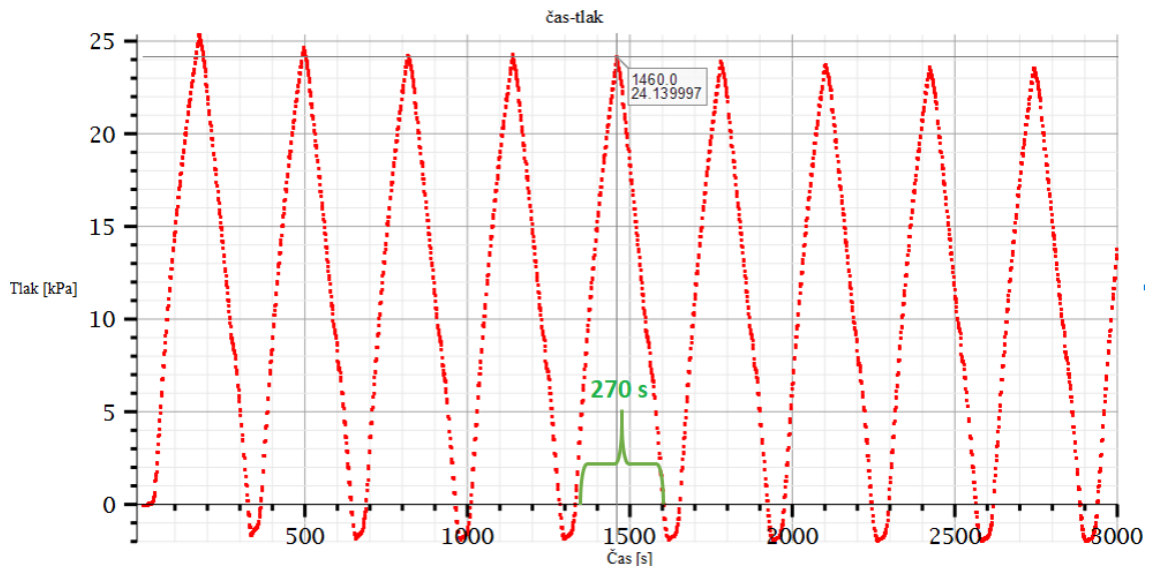
- 1) ze závislosti (čas – tlak) vyšetřit jestli dochází k ustálení cyklů
- 2) dále je zapotřebí zjistit průběhy (obvodových a axiálních) deformací v závislosti na čase a tlaku z obou kamer pro jednotlivá axiální zatížení
- 3) na základě porovnání prvního a posledního cyklu analyzovat zbytkové deformace
- 4) posoudit elastické (resp. inelastické) chování tubulárního elastomerního vzorku
- 5) srovnání předposledního a posledního cyklu
- 6) vliv předpětí způsobený axiálním zatížením

8 Vyhodnocení experimentálně naměřených dat

Cyklus zatěžování lze popsat jako postupné tlakování trubice, kdy je z hodnoty tlaku blízkého se nule, trubice natlakována v prvním cyklu zhruba na 28 kPa s následným poklesem k nulové hodnotě. Na obrázku lze pozorovat devět zatěžovacích cyklů, kde je zřejmé, že při stejném množství přivedené tekutiny do polymerní trubice dochází k nižšímu natlakování.



Obrázek 34: Graf závislosti tlakování na čase, znázorněna data charakterizující 5. cyklus, nezatíženo

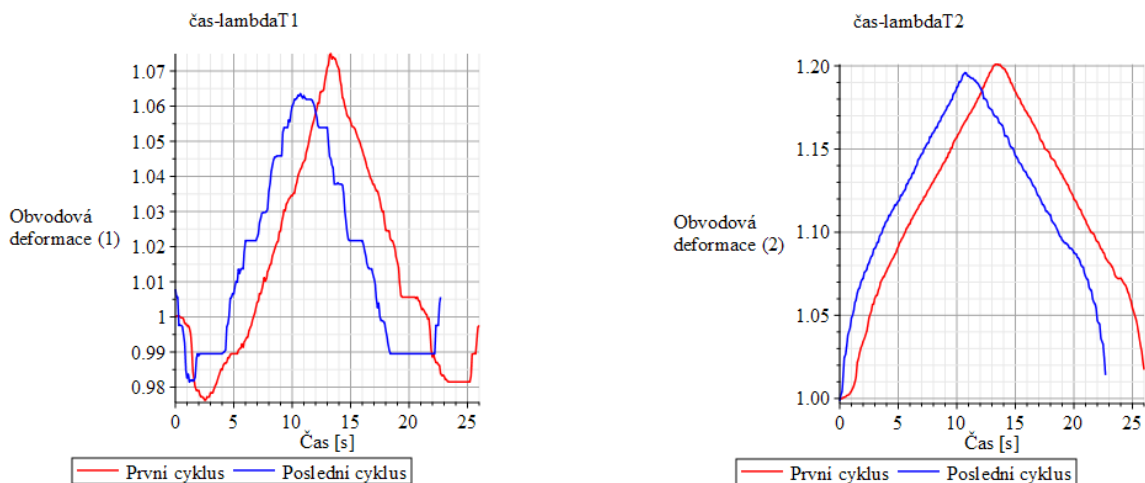


Obrázek 35: Graf závislosti tlakování na čase, znázorněna data charakterizující 5. cyklus, zatíženo 500g

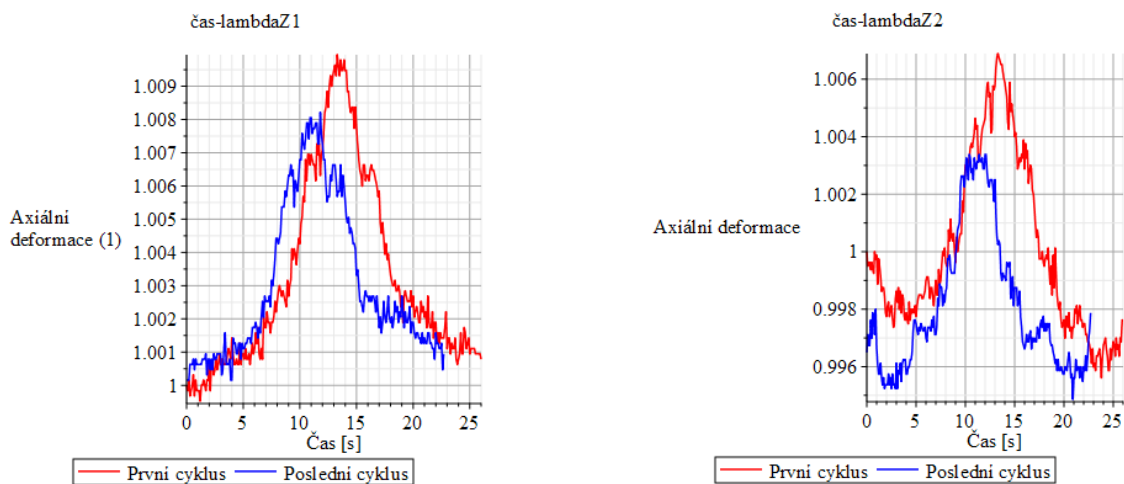
Přidáním axiálního zatížení jsou způsobeny změny v jednotlivých cyklech. Dochází k prodloužení doby jednotlivých cyklů s dosažením nižšího tlaku. Graficky znázorněno na obr. 34-35. Znamená to, že s přidáním axiálního závaží se cykly mají tendenci ustalovat.

8.1 První a poslední cyklus – bez axiálního zatížení

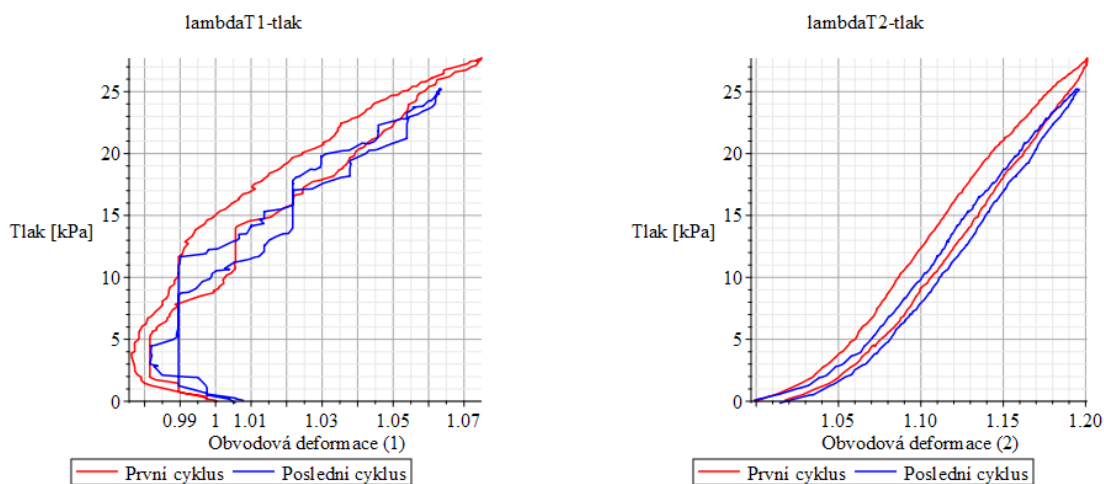
Již z prvních závislostí si lze povšimnout zajímavého fenoménu, kdy první cyklus dosahuje vyšších deformací než cyklus poslední. Tento jev může být důsledkem zbytkových deformací. Zbytkové deformace se projeví jako trvalé zvětšení průměru testované trubice (tečení materiálu – creep). Zvětšením průměru dochází k nárůstu objemu. Jelikož je tlakování trubice uskutečněno pístem s konstantním posuvem znamená to, že ve zdeformované trubici bude dosaženo nižšího tlaku. V axiálním směru při nulovém zatížení jsou deformace v prvním a posledním cyklu nepatrné.



Obrázek 36: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo

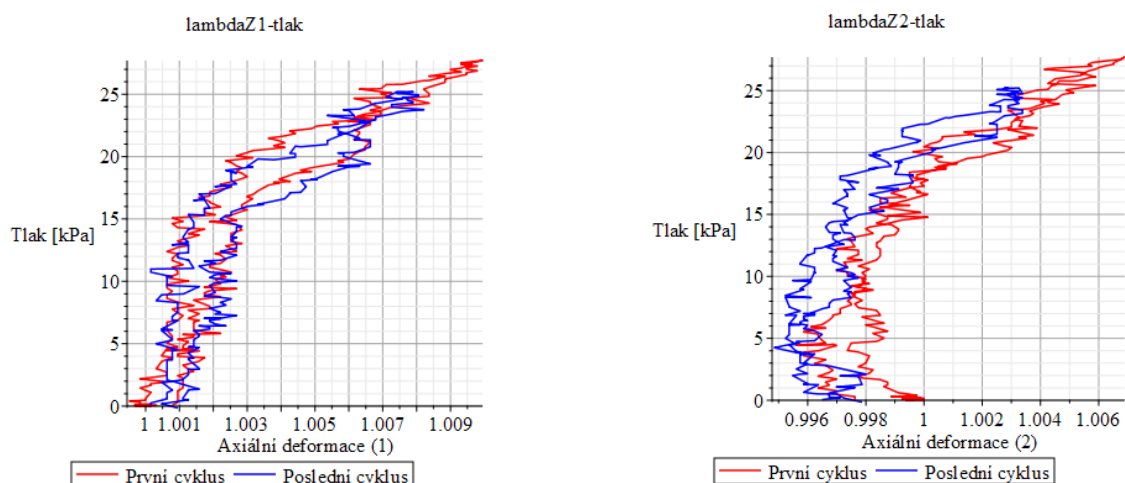


Obrázek 37: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo



Obrázek 38: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo

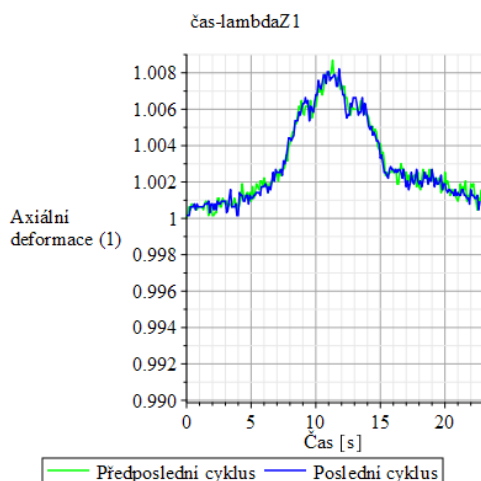
Jelikož odezva v prvním a posledním (n -tém) cyklu začíná téměř ze stejného místa ($\lambda_T = 1$), znamená to, že muselo dojít k poškození resp. změknutí materiálu, jelikož je dosaženo nižšího tlaku při stejném zdvihu pístu.



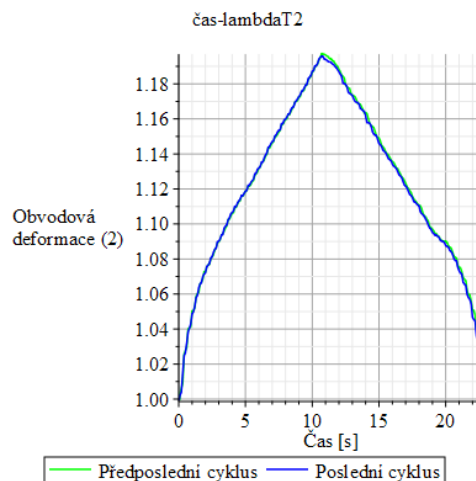
Obrázek 39: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo

8.2 Předposlední a poslední cyklus – bez axiálního zatížení

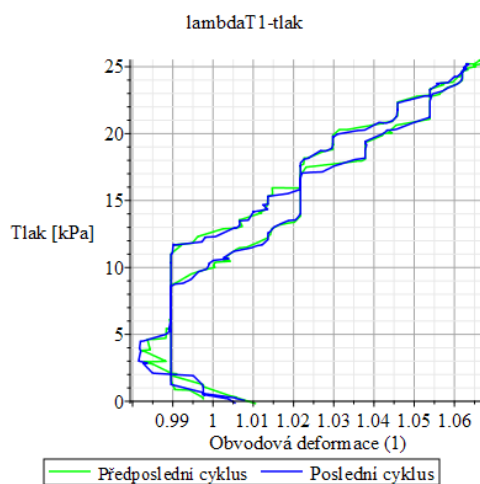
U předposledního a posledního cyklu jsem axiální deformaci vyhodnotil z kamery 1 a obvodovou z kamery 2, jelikož grafy výstižněji popisují očekávaný průběh. Rozdílnosti v jednotlivých grafech jsou způsobeny tím, že kamery snímají zkoušený vzorek pod jiným úhlem. Z toho plyne, že pod určitým úhlem se deformace polymerní trubice může jevit více způsobu. Tento jev by mohl být způsoben vyrovnáváním nekruhového průřezu trubice do kruhového. Z grafů je zřejmé, že křivky pro předposlední ($n-1$) a poslední (n -tý) cyklus jsou téměř shodné (dochází k ustálení).



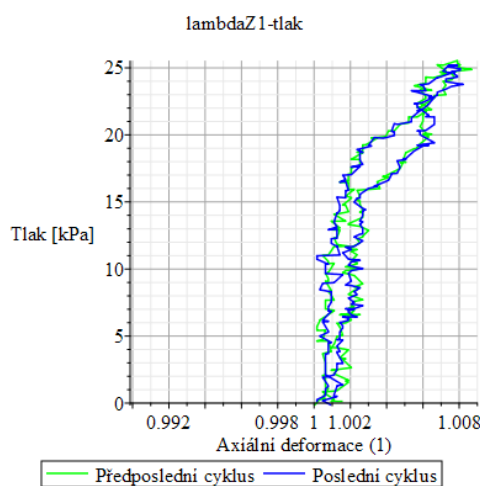
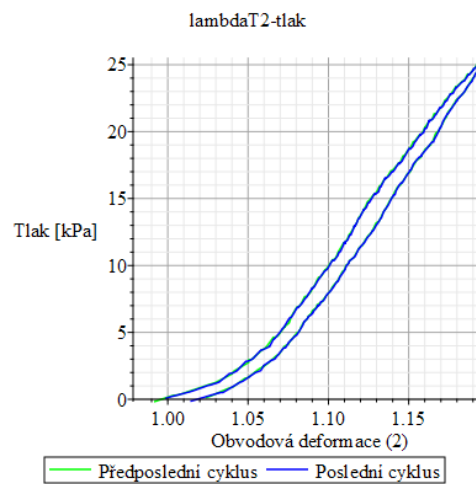
Obrázek 40: Graf závislosti axiální deformace (λ_{Z1}) na čase, kamera1, předposlední a poslední cyklus, nezatíženo



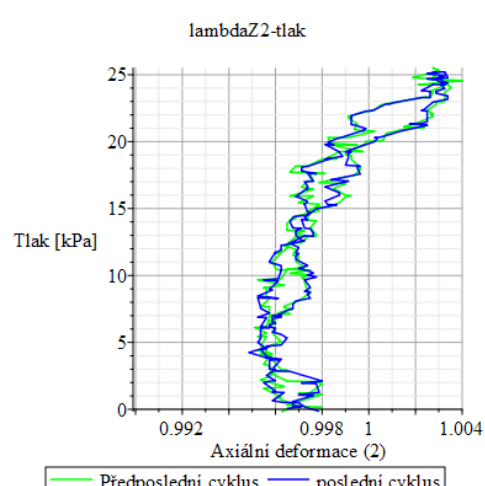
Obrázek 41: Graf závislosti obvodové deformace (λ_{T2}) na čase, kamera2, předposlední a poslední cyklus, nezatíženo



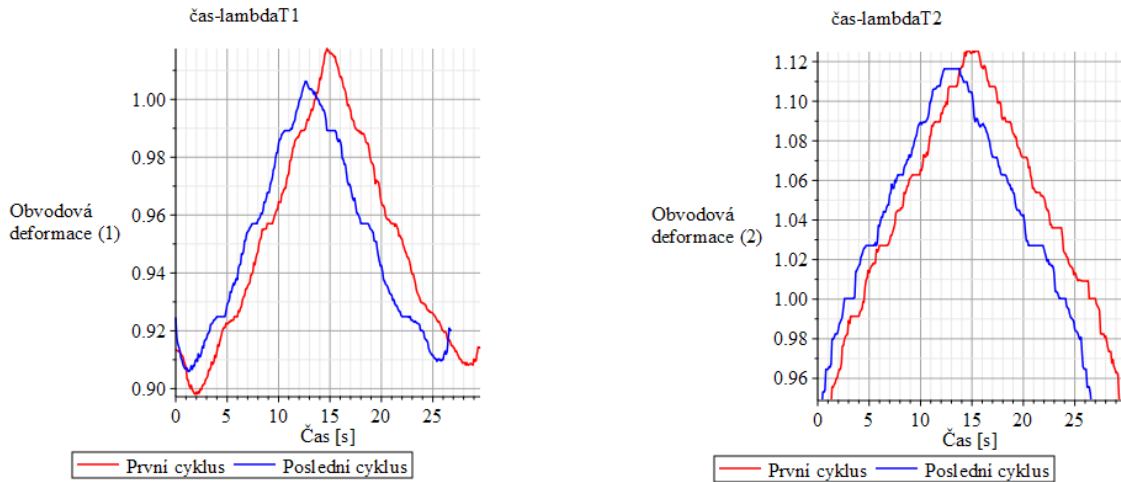
Obrázek 42: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, nezatíženo



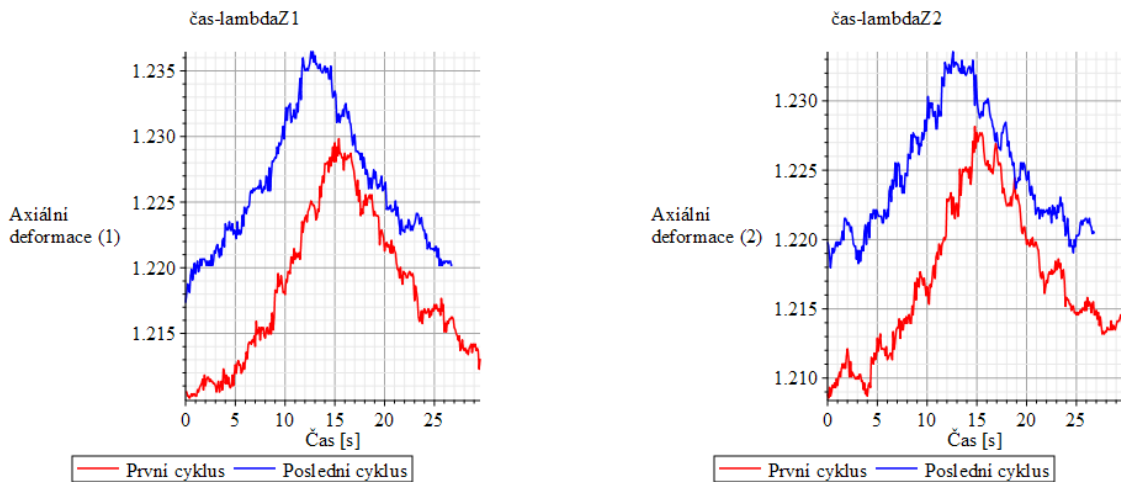
Obrázek 43: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, nezatíženo



8.3 První a poslední cyklus – s axiálním zatížením 500g



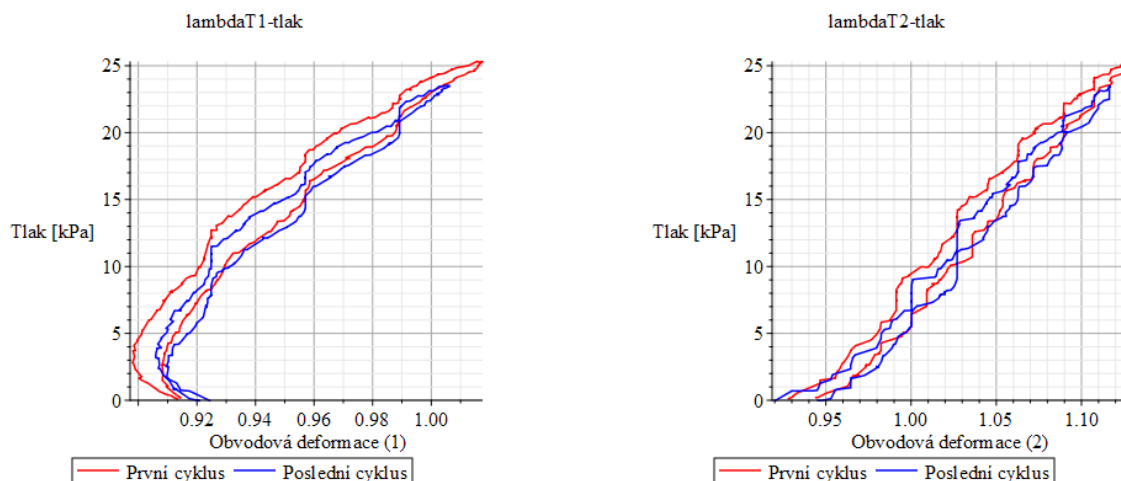
Obrázek 44: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatížení 500g



Obrázek 45: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatížení 500g

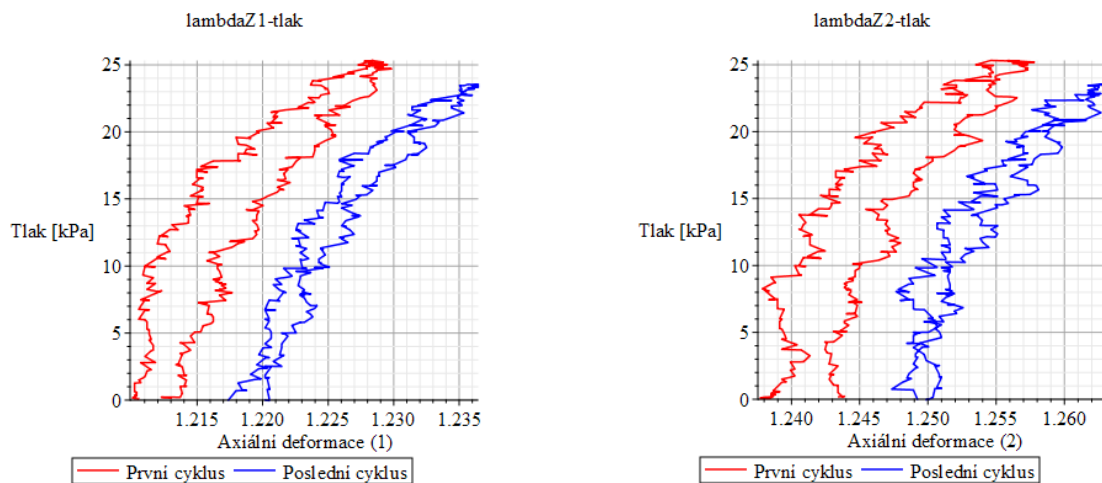
Z grafů lze pozorovat, že odezva polymerního materiálu není dokonale elastická, protože zatěžování probíhá po jiné dráze než odlehčení. Inelastické chování je pro tyto materiály charakteristické.

Ze závislosti obvodové deformace na tlaku (viz.obr. 46) je zřejmé, že v radiálním směru nedochází téměř k žádné plastické deformaci (creepu).



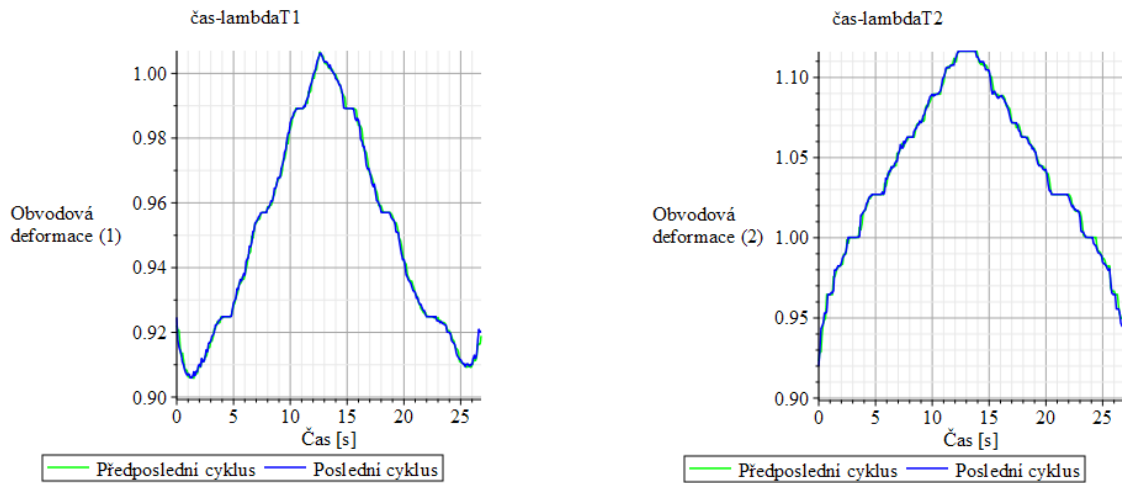
Obrázek 46: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatížení 500g

Přidáním závaží dochází k většímu creepu v axiálním směru (viz. obr. 47), kde je plastická deformace patrná na první pohled.

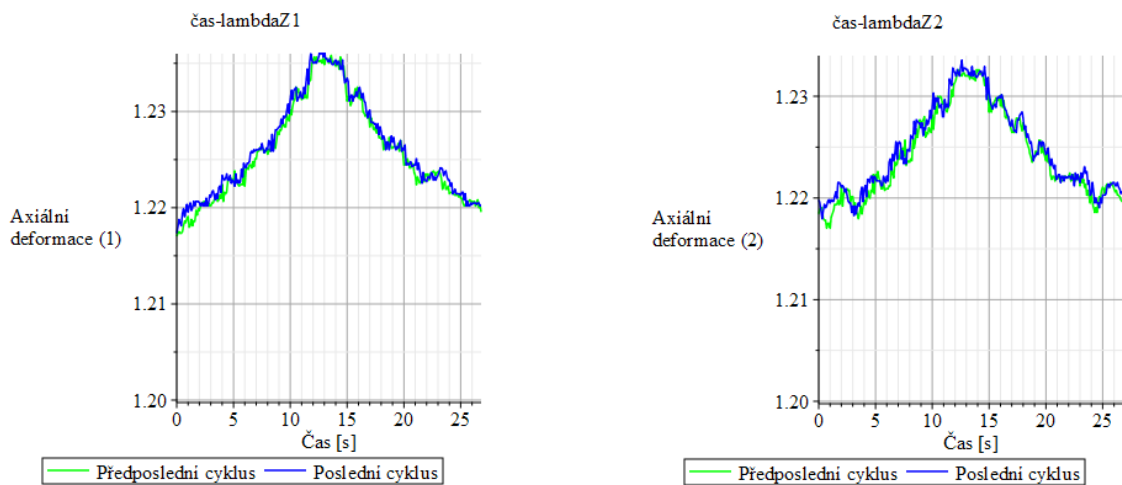


Obrázek 47: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatížení 500g

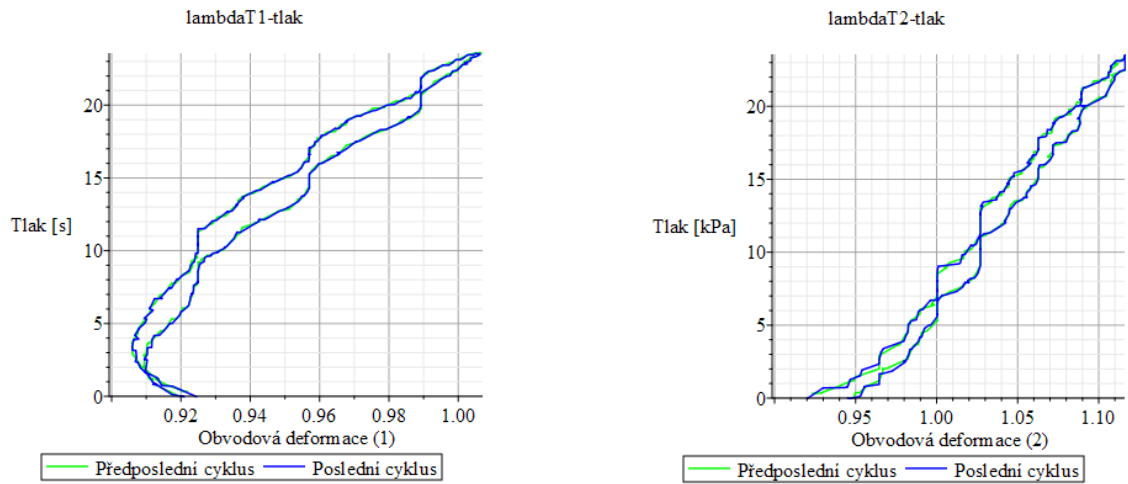
8.4 Předposlední a poslední cyklus – s axiálním zatížením 500g



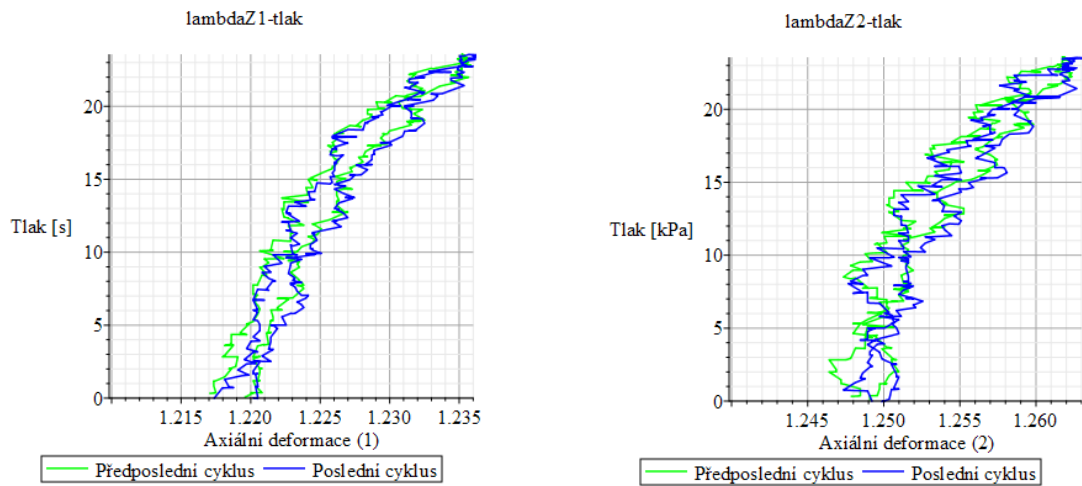
Obrázek 48: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatížení 500g



Obrázek 49: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g



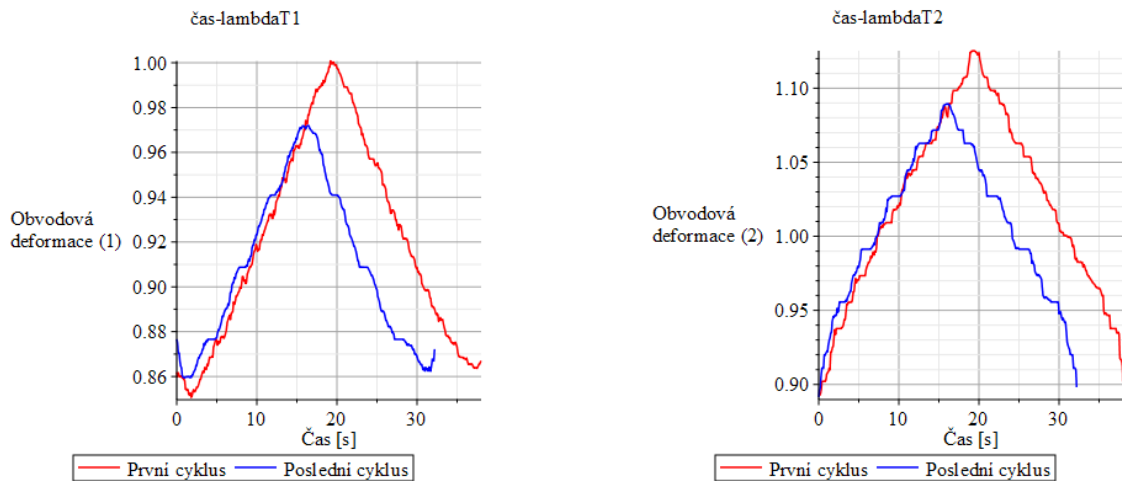
Obrázek 50: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g



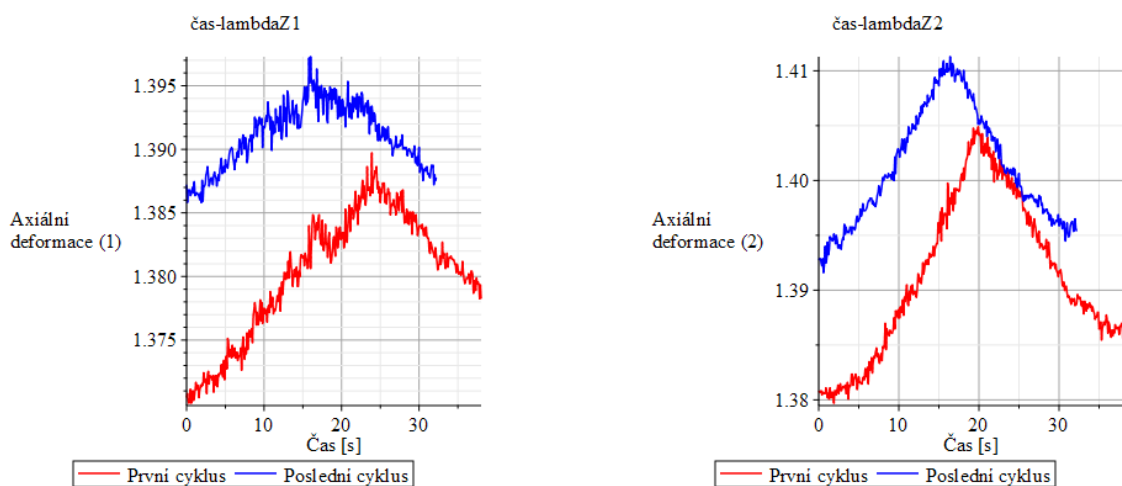
Obrázek 51: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g

8.5 První a poslední cyklus – s axiálním zatížením 750g

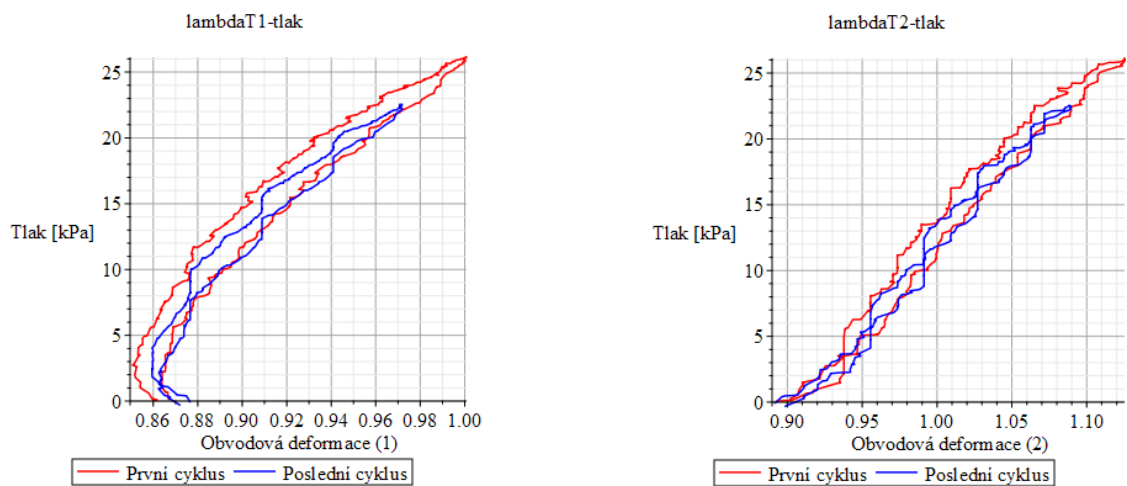
Při bližším prozkoumání grafických závislostí je zřejmé, že již popsané fenomény pro axiální zatížení 500g se v případě experimentu s 750g závažím více zvýraznily. Porovnání obr. 47-55 potvrzuje předpokládaný fakt, že při větším zatížení dochází k většímu creepu v axiálním směru. V radiálním směru jsou deformace opět takřka nepozorovatelné.



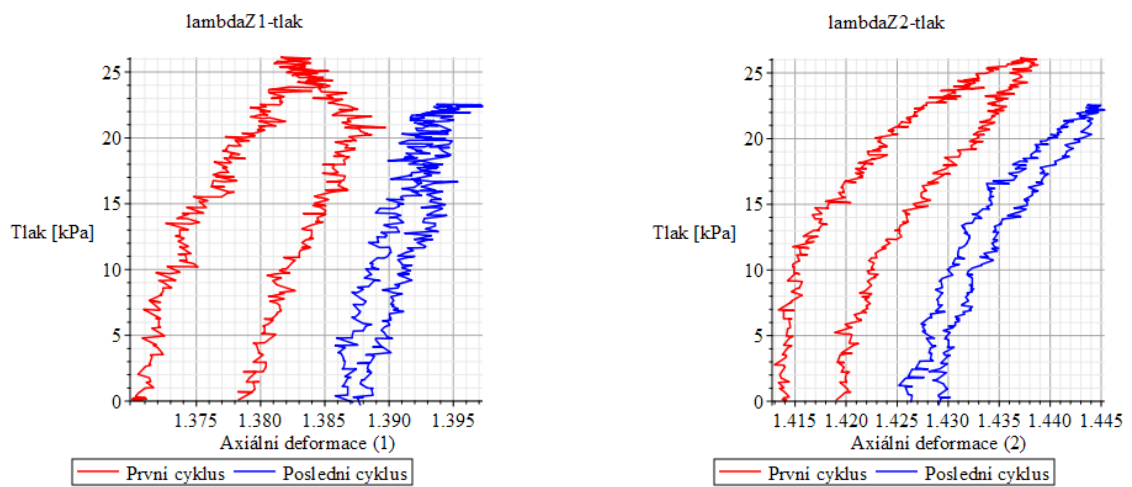
Obrázek 52: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g



Obrázek 53: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g

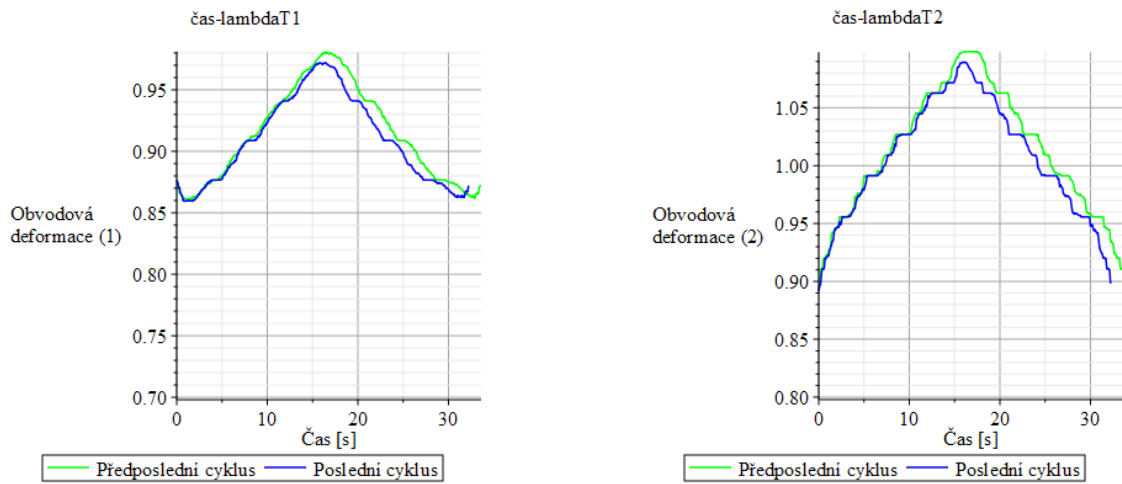


Obrázek 54: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g

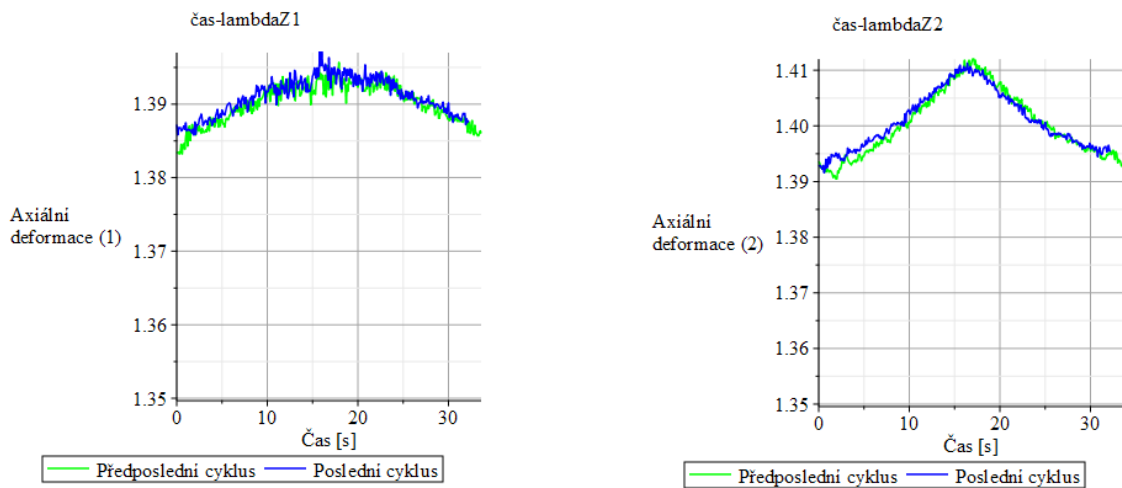


Obrázek 55: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g

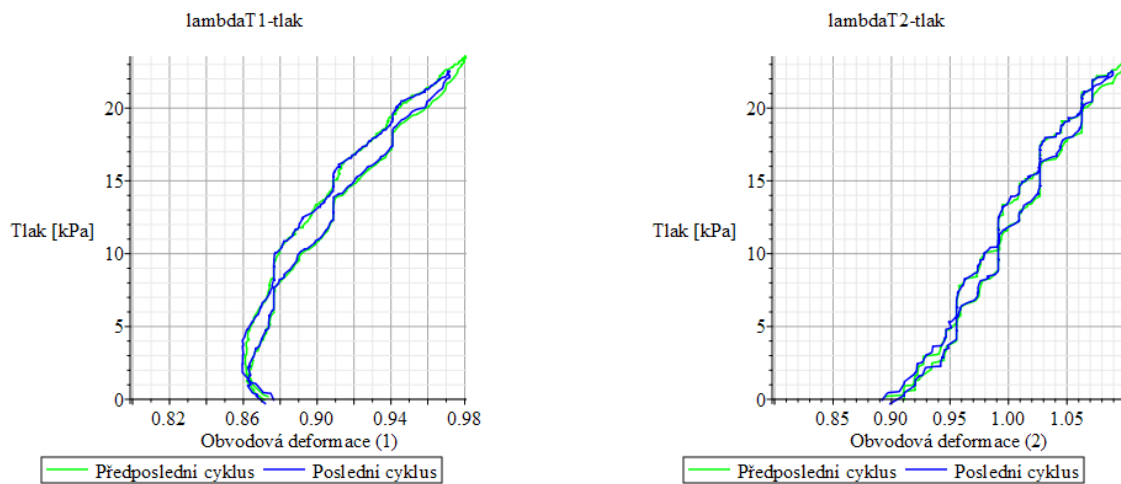
8.6 Předposlední a poslední cyklus – s axiálním zatížením 750g



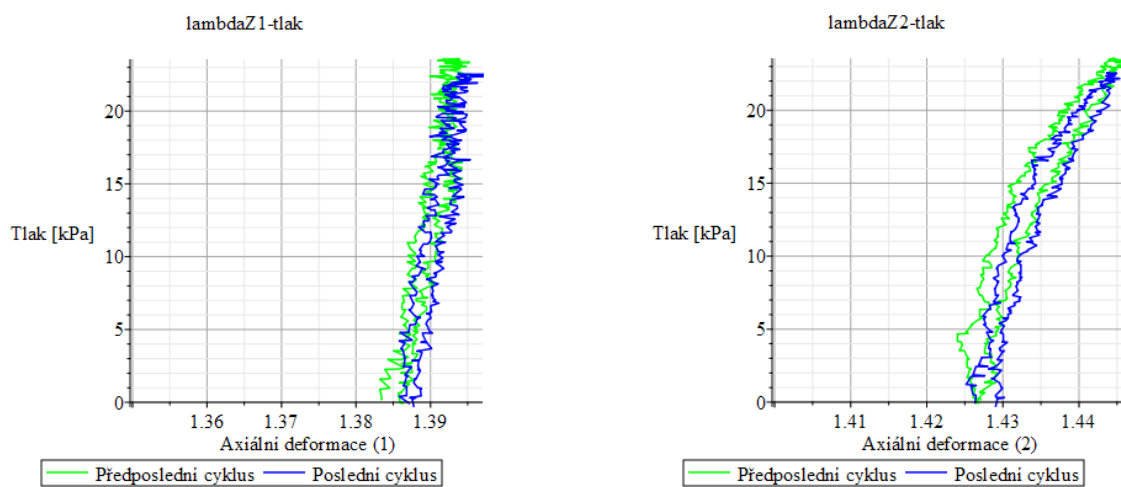
Obrázek 56: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g



Obrázek 57: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g

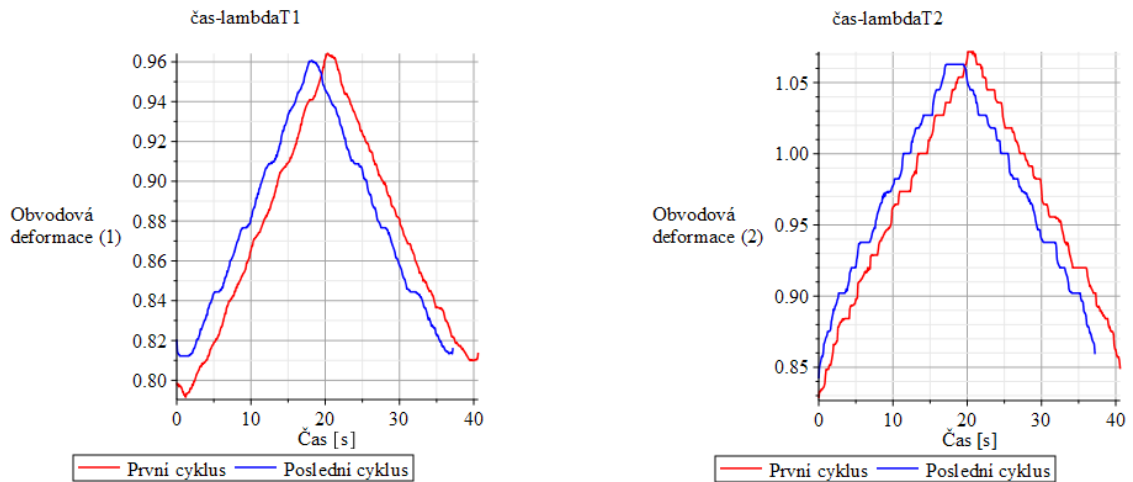


Obrázek 58: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g



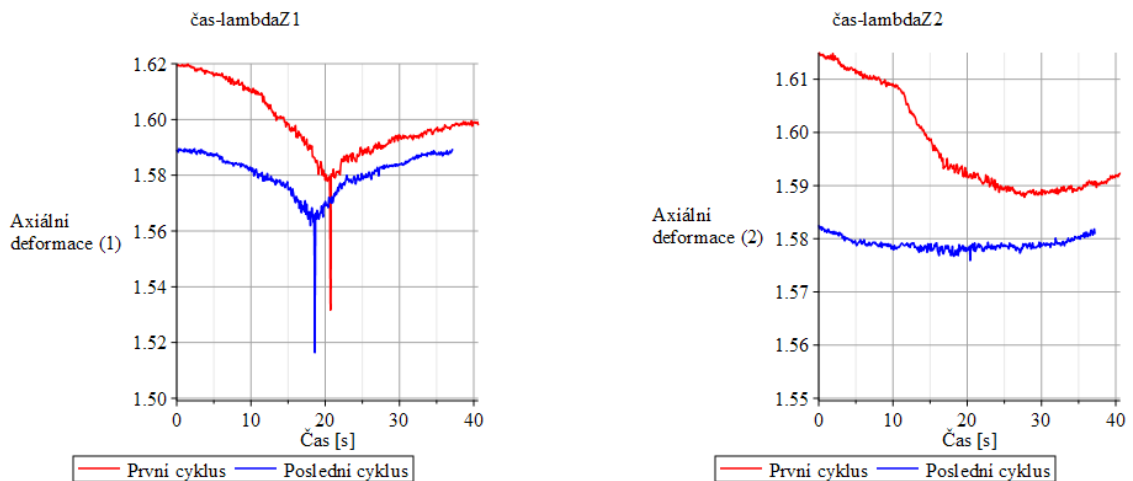
Obrázek 59: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g

8.7 První a poslední cyklus – s axiálním zatížením 1000g

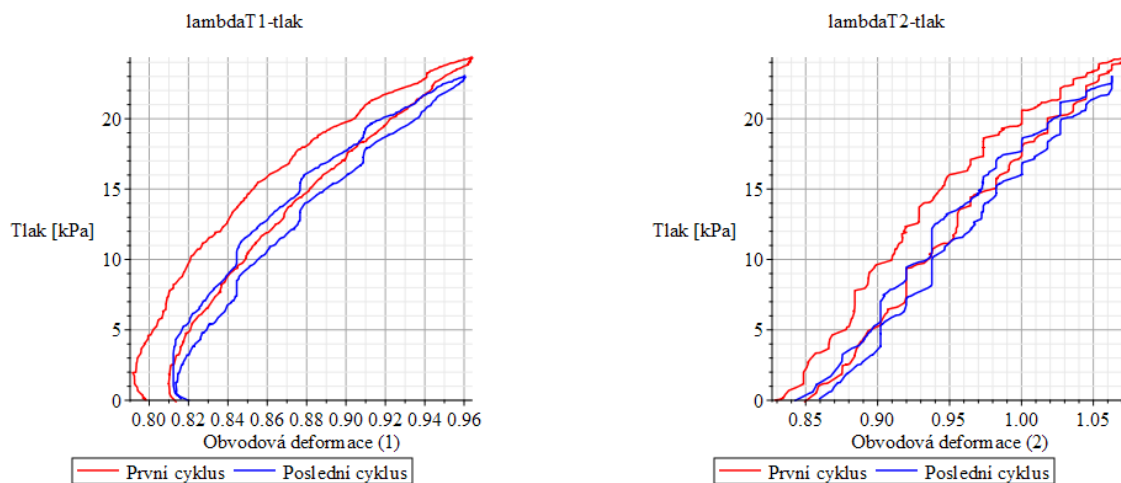


Obrázek 60: Graf závislosti obvodová deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g

Na obr. 61 je zřejmý zajímavý artefakt. Zcela jistě se nejedná o odezvu materiálu. Zde pravděpodobně došlo k selhání vyhodnocení nebo nějaké chybě při záznamu.

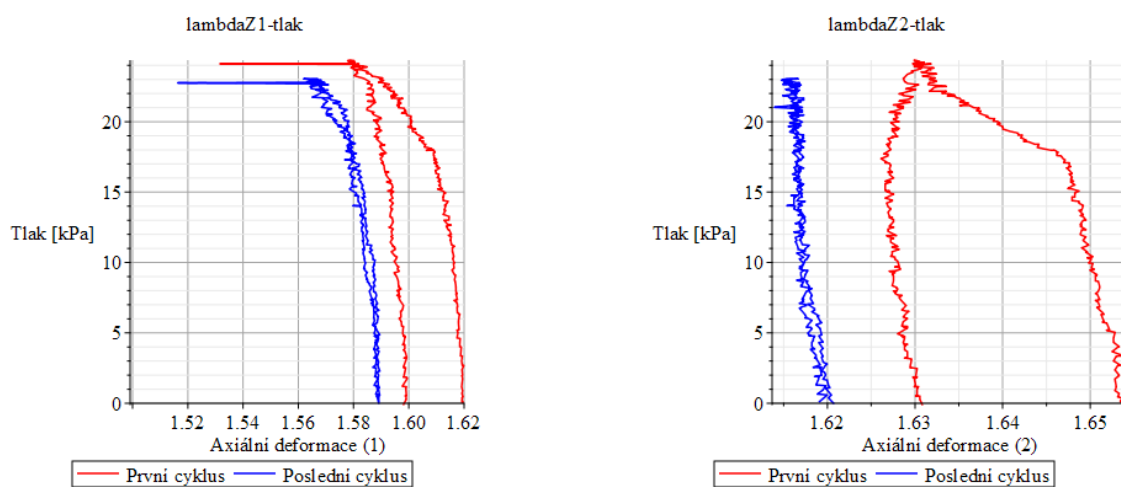


Obrázek 61: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g



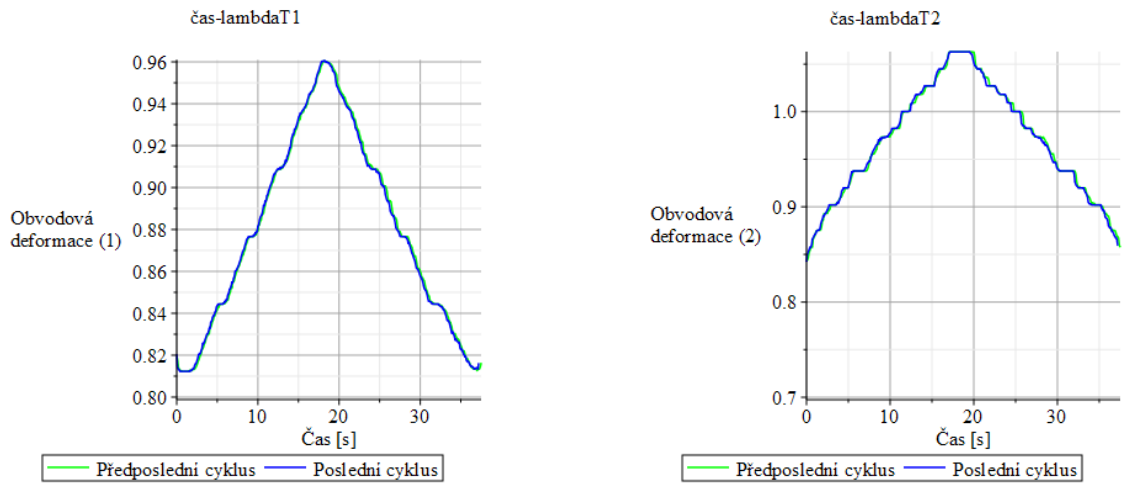
Obrázek 62: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g

Zde je opět zřetelný artefakt, který s odezvou materiálu nemá nic společného.

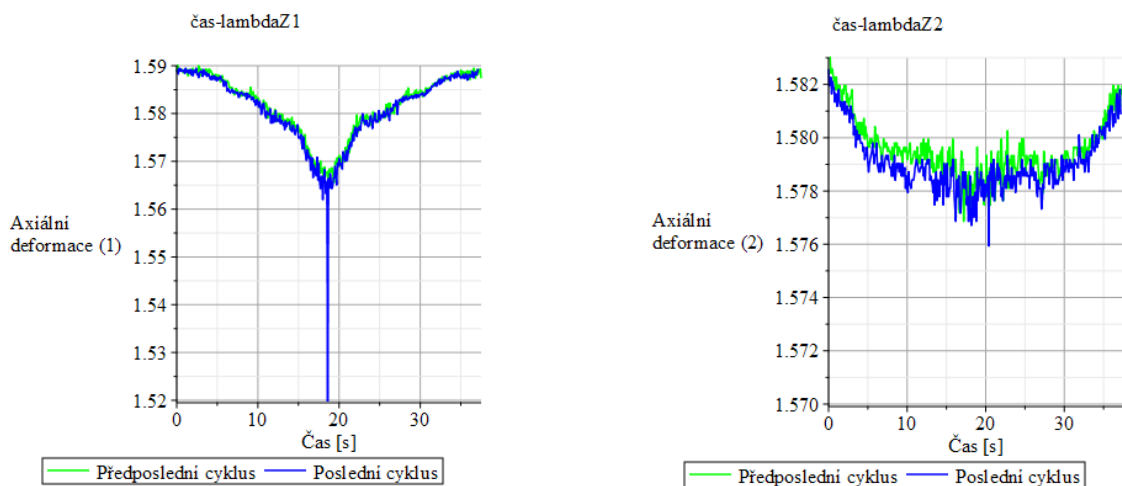


Obrázek 63: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g

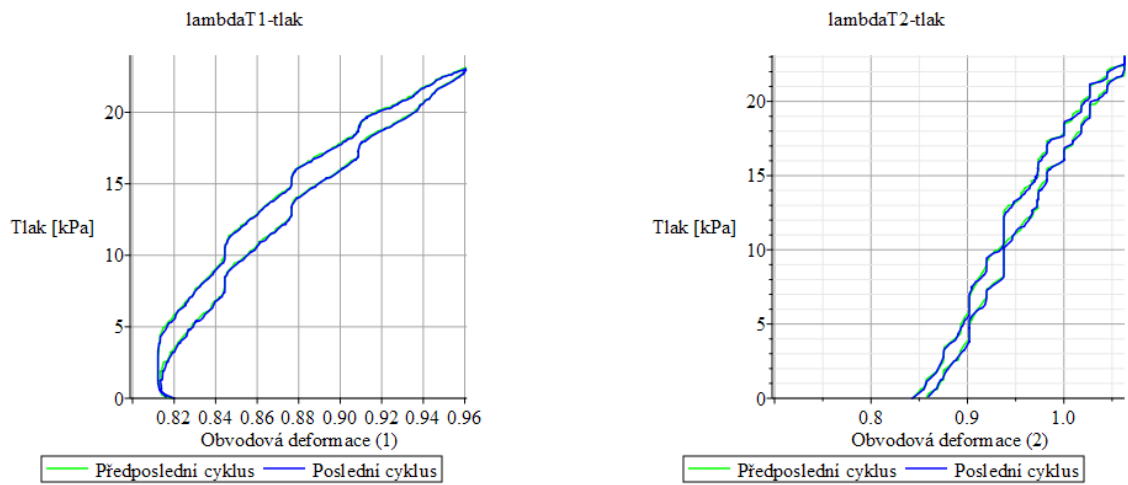
8.8 Předposlední a poslední cyklus – s axiálním zatížením 1000g



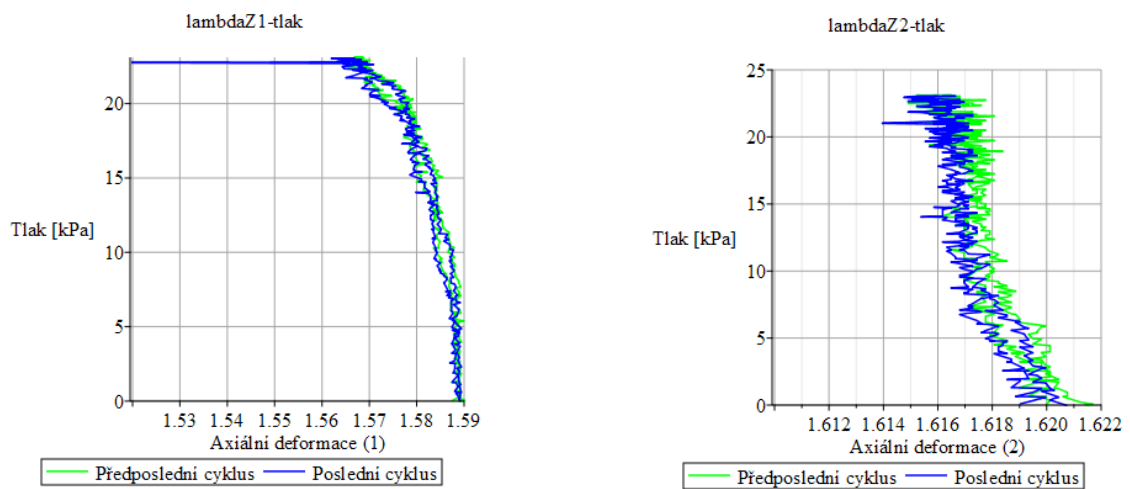
Obrázek 64: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g



Obrázek 65: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g



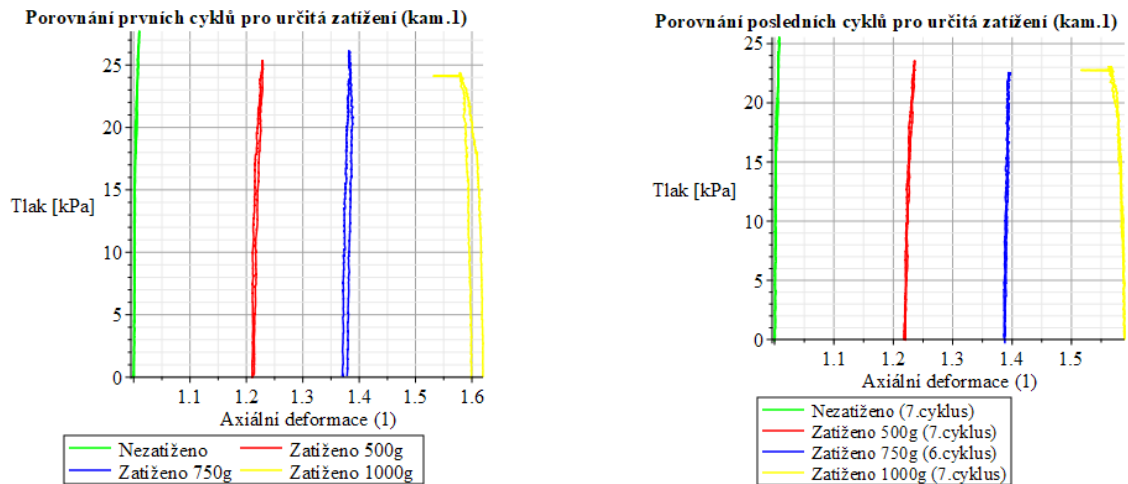
Obrázek 66: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g



Obrázek 67: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g

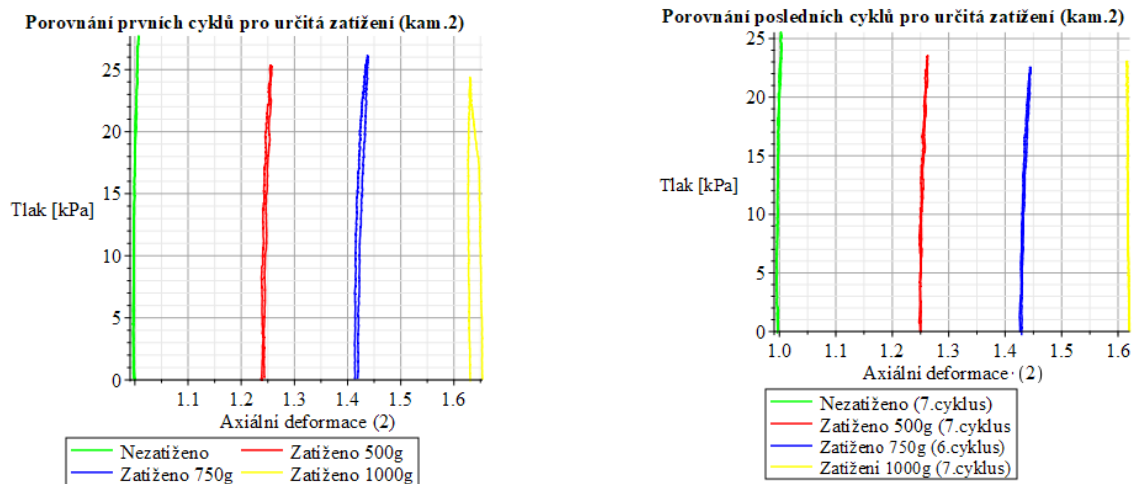
8.9 Porovnání prvních a posledních cyklů pro jednotlivá zatížení

Z porovnání prvních - posledních (n-tých) a předposledních (n-1) - posledních (n-tých) cyklů je patrné, že se zatěžovací křivky mají tendenci přibližovat k odlehčovacím křivkám. To znamená, že určitým přecyklováním viskoelastického materiálu se přiblížíme elastickému stavu.



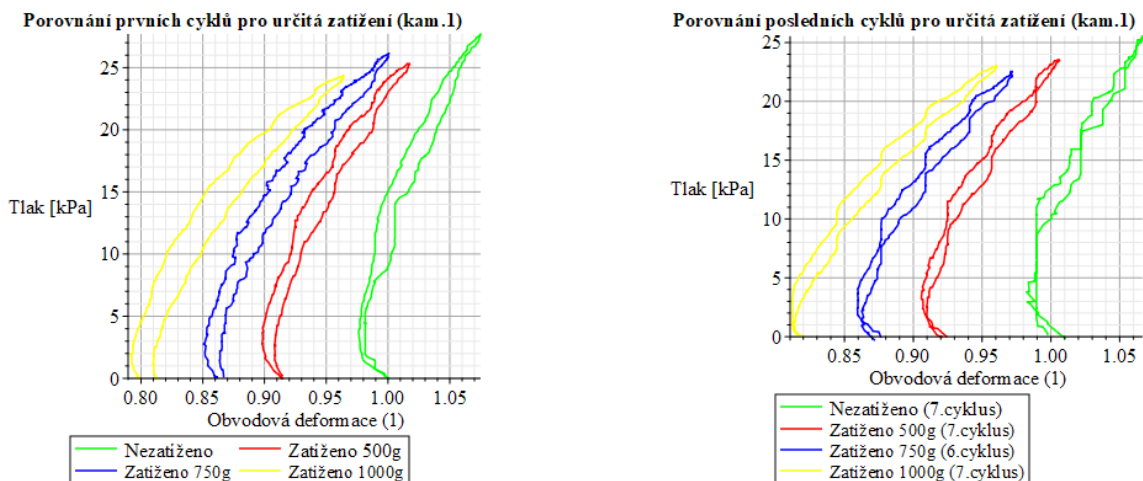
Obrázek 68: Graf závislosti axiální deformace (λ_{Z1}) na tlaku, kamera1, první a poslední cykly, všechna zatížení

Ze závislostí tlak - axiální deformace se zdá, že nedochází ke snížení tuhosti, jelikož směrnice tečen (zelená, červená, modrá, žlutá) se jeví přibližně stejně.

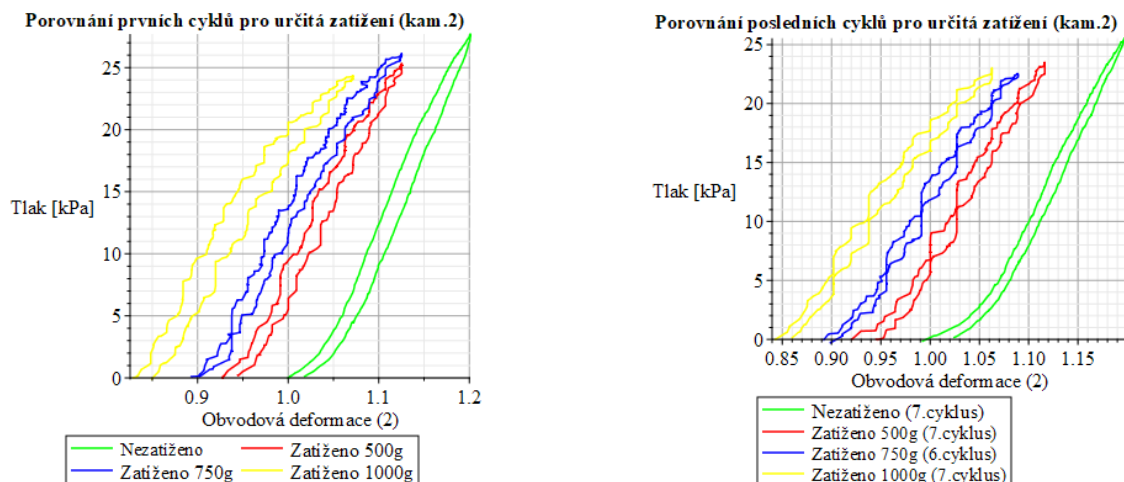


Obrázek 69: Graf závislosti axiální deformace (λ_{Z2}) na tlaku, kamera2, první a poslední cykly, všechna zatížení

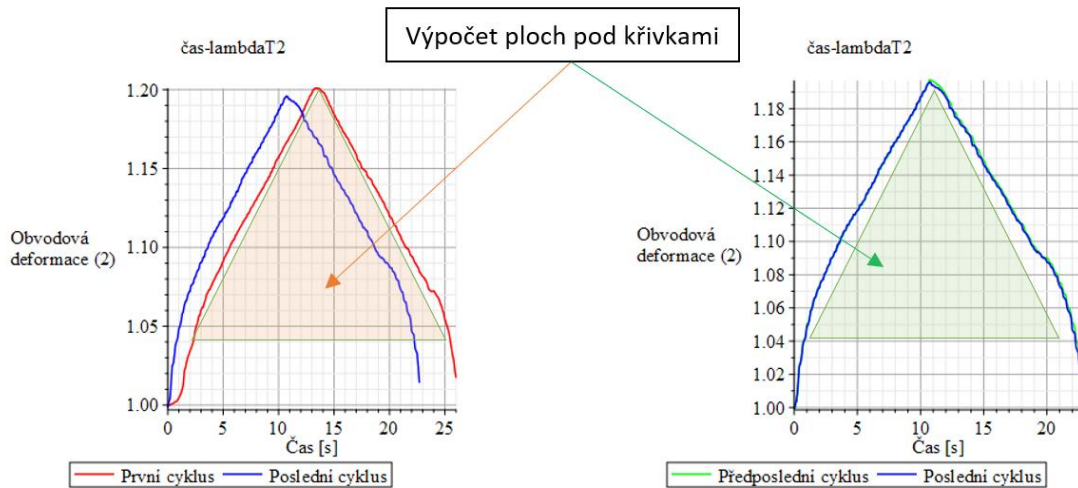
Porovnáním žluté a zelené křivky ze závislosti tlak – obvodová deformace se zdá, že přidávání axiálního závaží vede k snížení hodnoty dosaženého maximálního tlaku. Dále je patrné, že dochází ke snížení směrnice tečny, což lze vysvětlit jako snížení tuhosti elastomerní trubice. Ke snížení tuhosti dochází při tlacích nad 5 kPa.



Obrázek 70: Graf závislosti obvodové deformace (λ_{T1}) na tlaku ,kamera1, první a poslední cykly, všechna zatížení



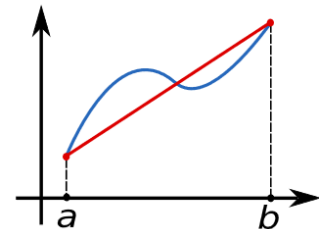
Obrázek 71: Graf závislosti obvodové deformace (λ_{T2}) na tlaku ,kamera2, první a poslední cykly, všechna zatížení



Obrázek 72: Schématické zobrazení ploch pod křivkami

Výpočet ploch pod jednotlivými křivkami byl proveden numerickou integrací, kde jsem využil aproximace lichoběžníkové metody k dosažení přesnějších výsledků. Samotný výpočet byl aplikován v programu Microsoft Excel. Výsledky výpočtů jsou zobrazeny v tabulkách 1 až 4.

$$\begin{aligned}
 \int_a^b f(x) dx &\approx \frac{\Delta x}{2} \sum_{k=1}^N (f(x_{k-1}) + f(x_k)) \\
 &= \frac{\Delta x}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + 2f(x_3) + \dots + 2f(x_{N-1}) + f(x_N)) \\
 &= \frac{\Delta x}{2} \left(f(x_0) + 2 \sum_{k=1}^{N-1} f(x_k) + f(x_N) \right)
 \end{aligned}$$



Obrázek 73: Model numerické integrace lichoběžníkovou metodou [24]

Postupné ustálení cyklů je patrné z porovnání hodnot získaných výpočtem obsahu jednotlivých ploch pod křivkami. Srovnáním poměru1 (první/poslední) s poměrem2 (poslední/předposlední) získám informaci, že obsahy ploch předposledního a posledního cyklu jsou až na malé odchylky téměř stejně velké. Naopak u prvního a posledního cyklu je rozdíl obsahů poměrně znatelný.

Nezatíženo	obsah prv. cyklus	obsah posled. cyklus	obsah předp. cyklus	poměr= prv./posled.	poměr=posled./předp.
čas-lamT2	28.99939	25.45277	25.57044	1.139341	0.995398
čas-lamT1	26.36125	23.06806	23.17771	1.14276	0.995269
čas-lamZ2	26.00754	22.66291	22.76364	1.147581	0.995575
čas-lamZ1	26.09194	22.77547	22.87647	1.145616	0.995585

Tabulka 1: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (nezatíženo)

500g	obsah prv. cyklus	obsah posled. cyklus	obsah předp.cykus	poměr= prv./posled.	poměr=posled./předp.
čas-lamT2	31.00046	27.96864	27.9259	1.108401	1.001531
čas-lamT1	28.27949	25.48771	25.49071	1.109534	0.999882
čas-lamZ2	36.26512	32.88507	32.87126	1.102784	1.00042
čas-lamZ1	36.3056	32.92522	32.91123	1.102668	1.000425

Tabulka 2: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (zatíženo - 500g)

750g	obsah prv. cyklus	obsah posled. cyklus	obsah předp. cyklus	poměr= prv./posled.	poměr=posled./předp.
čas-lamT2	38.80819	32.40727	34.0331	1.197515	0.952228
čas-lamT1	34.96276	29.27302	30.6973	1.194368	0.953603
čas-lamZ2	52.86509	45.11419	47.05408	1.171806	0.958773
čas-lamZ1	52.44516	44.79205	46.70826	1.170859	0.958975

Tabulka 3: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (zatíženo - 750g)

1000g	obsah prv. cyklus	obsah posled. cyklus	Obsah předp. cyklus	poměr= prv./posled.	poměr=posled./předp.
čas-lamT2	39.08239	36.06457	36.33228	1.083678	0.992632
čas-lamT1	35.45973	32.73112	32.98548	1.083364	0.992289
čas-lamZ2	64.86863	58.74115	59.23512	1.104313	0.991661
čas-lamZ1	64.93018	58.81023	59.3143	1.104063	0.991502

Tabulka 4: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (zatíženo - 1000g)

9 Závěr

Cílem práce bylo seznámení se s polymerními materiály, kde byla provedena rešeršní část. V práci jsem shrnul základní rozdělení polymerů, jejich strukturu, tvar makromolekuly, vliv molekulové hmotnosti na mechanické vlastnosti a jejich základní typy syntézy. V neposlední řadě byla věnována pozornost i recyklaci a třídění polymerů, jelikož tento problém nabývá globálního rozsahu a nemůže být opomenut.

V další kapitole práce jsem se zabýval nelineárními trubicemi, jak biologickými, tak nebiologickými. Zde byla provedena rešerše shrnující základní charakteristiky tepen, jícnu, tenkého a tlustého střeva. Okrajově byly popsány i nebiologické nelineární trubice, jako jsou silikonové hadičky v lékařství či automobilovém průmyslu.

Dále jsem se seznámil s experimentálními metodami používanými pro zjišťování mechanických vlastností polymerů, kde jsem dopodrobna popsal získávání dat pomocí inflačně – extenzního experimentu elastomerní trubice. Okrajově byly popsány další metody, které se pro polymerní materiály využívají (tahová zkouška, zkoušky tvrdosti, ohybová a rázová zkouška).

Nejdůležitější částí této práce bylo analytické vyhodnocení naměřených dat z inflačně - extenzního experimentu, které bylo provedeno v programu Maple. Inflačně - extenzní test je realizován pomocí axiálního (podélného) závaží elastomerní trubice v kombinaci s jejím nafukováním, které probíhá přivedením kapaliny pod určitým tlakem. Mně poskytnutá data, byla ve formě excelovských tabulek, kde byly na základě jasů identifikovány hrany elastomerní trubice pro jednotlivá zatížení. V první řadě bylo nutností naučit se alespoň základy v programu maple a poté již probíhalo vyhodnocování jednotlivých závislostí, které bylo nutné provést pro každé axiální zatížení zvlášť. Z vyhodnocených grafů bylo specifikováno viskoelastické chování elastomerní trubice.

Bylo potvrzeno, že dochází k ustálení odezvy materiálu, jelikož maximální hodnoty tlaku v jednotlivých cyklech měly jasnou klesající tendenci. Ta byla způsobena vlivem zbytkových napětí, která se v elastomerní trubici projevila jako plastická deformace. Kromě toho dochází k poškození materiálu, které se projevuje zvyšováním jeho poddajnosti resp. snižováním tuhosti. Další vlastností, kterou z grafů bylo možné určit je vliv axiálního předpětí trubice. Je patrné, že s rostoucím předpětím se odlehčovací křivka přibližuje ke křivce zatěžovací. Znamená to, že trubice s předpětím se chová více elasticky než trubice nepředepjatá. Numerickou integrací byly vypočítány plochy pod křivkami závislostí deformace (obvodová i axiální) na čase, z kterých bylo

tvrzení o ustálení cyklů potvrzeno, jelikož plochy pro první a poslední cyklus byly znatelně rozdílné ve srovnání předposledního a posledního cyklu, kde se vypočtené plochy téměř nelišily.

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (nezatíženo)	64
Tabulka 2: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (zatíženo - 500g)	64
Tabulka 3: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (zatíženo - 750g)	64
Tabulka 4: Obsahy ploch pod křivkami, poměry (zatíženo - 1000g)	64

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Produkce polymerů v závislosti na čase. [1]	10
Obrázek 2: Spotřeba polymerů z hlediska průmyslů (rok 2003). [2]	11
Obrázek 3: Rozdělení tvarů makromolekul – a) lineární, b) rozvětvené, c) ideální síť, d) reálná síť. [2]	12
Obrázek 4: Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru makromolekul. [1]	13
Obrázek 5: Distribuční křivka - M_n = početně střední mol. hm. , M_w = hmotnostně střední mol. hm. [3]	13
Obrázek 6 : Schématické rozdělení fází ve krystalickém a amorfním polymer v závislosti na teplotách specifikovaných výše. [2]	14
Obrázek 7: Termomechanická křivka - závislost modulu pružnosti na teplotě s vyznačenými teplotami specifikovaných výše. [3]	15
Obrázek 8: Schématické znázornění iniciace, propagace, terminace. [3]	16
Obrázek 9: Chemické vzorce nejvýznamnějších produktů polymerace. [1]	16
Obrázek 10: Schématický průběh recyklace	18
Obrázek 11: Schématické srovnání energie při výrobě, recyklaci a spalování (HDPE-igelitové sáčky, PET lahve). [18]	19
Obrázek 12: Struktura jícnu a jeho rozdělení. [7]	22
Obrázek 13: Trávicí ústrojí, tenké a tlusté střevo. [8]	23
Obrázek 14: Vlevo (1.) se nachází nosní kanyla [12], vpravo (2.) pletená cévní náhrada s kolagenem. [11]	24
Obrázek 15: Vlevo (1.) palivová hadice [14], vpravo (2.) hadička do odšťikovačů. [15]	25
Obrázek 16: Zobrazení referenčního (vlevo) a deformovaného stavu (vpravo). [16]	27
Obrázek 24: Válcová trubice před deformací (čárkovaná - zelená) a po deformaci (plná - černá); materiálová částice Q přechází z (R, Θ , Z) na (r, θ , z); R je označení radiální souřadnice, Z délkové souřadnice a Θ úhlové souřadnice	25
Obrázek 19: Metoda řezu na tělese ve statické rovnováze (SR) a vektory intenzity vnitřních sil. [17]	27
Obrázek 20: Složky tenzoru σ a vektory skutečné intenzity vnitřních sil. [16]	27
Obrázek 21: Schématické zobrazení deformování tubulárního vzorku během inflačně-extenzivního testu; malá písmena značí stav po zdeformování	30
Obrázek 22: Fotografie zkušební vzorku s názorným popisem	31
Obrázek 23: Schéma experimentu	32
Obrázek 24: Vybrání oblastí ROI	32
Obrázek 25: Schématické znázornění a použitý výpočtový vztah obvodové deformace v elastomerní trubici	27
Obrázek 26: Schématické znázornění a použitý výpočtový vztah axiální deformace v elastomerní trubici	27
Obrázek 27: Detekce a prahování hran ROI	32
Obrázek 28: Fotografie tahové zkoušky polymerního materiálu (vpravo), grafické zpracování dat naměřených tahovou zkouškou (vlevo), σ_m (mez pevnosti), σ_b (napětí při kterém dojde k přetržení zkušební vzorku) [1]	38
Obrázek 29: Fotografie tlakové zkoušky polymerního materiálu (vpravo), grafické zpracování dat naměřených tlakovou zkouškou (vlevo) [1]	39
Obrázek 30: Schématické znázornění vrypové zkoušky	38

Obrázek 31: Rozdělení vnikacích zkoušek dle tvaru identoru [22]	38
Obrázek 32: Schématické zobrazení Shoreho odrazové zkoušky (vlevo), druhy identoru [1]	39
Obrázek 33: Fotografie ohybové zkoušky polymerního materiálu (vpravo), grafické zpracování dat naměřených obybovou zkouškou (vlevo) [1]	40
Obrázek 34: Schématický průběh zkoušky rázovým kladivem [24]	41
Obrázek 35: Graf závislosti tlakování na čase, znázorněna data charakterizující 5. cyklus, nezatíženo	40
Obrázek 36: Graf závislosti tlakování na čase, znázorněna data charakterizující 5. cyklus, zatíženo 500g	40
Obrázek 37: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo	41
Obrázek 36: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo	41
Obrázek 38: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo	42
Obrázek 39: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, nezatíženo	42
Obrázek 40: Graf závislosti axiální deformace (λ_{Z1}) na čase, předposlední a poslední cyklus, nezatíženo	43
Obrázek 41: Graf závislosti obvodové deformace (λ_{T2}) na čase, předposlední a poslední cyklus, nezatíženo	43
Obrázek 42: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, nezatíženo	43
Obrázek 43: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, nezatíženo	43
Obrázek 44: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 500g	44
Obrázek 45: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 500g	44
Obrázek 46: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 500g	45
Obrázek 47: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 500g	45
Obrázek 48: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g	46
Obrázek 49: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g	46
Obrázek 50: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g	47
Obrázek 51: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 500g	47
Obrázek 52: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g	48
Obrázek 53: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g	48
Obrázek 54: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g	49

Obrázek 55: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 750g	49
Obrázek 56: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g	50
Obrázek 57: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g	50
Obrázek 58: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g	51
Obrázek 59: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 750g	51
Obrázek 60: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g	52
Obrázek 61: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g	52
Obrázek 62: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g	53
Obrázek 63: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), první a poslední cyklus, zatíženo 1000g	53
Obrázek 64: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g	54
Obrázek 65: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na čase, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g	54
Obrázek 66: Graf závislosti obvodové deformace ($\lambda_{T1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g	55
Obrázek 67: Graf závislosti axiální deformace ($\lambda_{Z1,2}$) na tlaku, kamera1 (vlevo), kamera2 (vpravo), předposlední a poslední cyklus, zatíženo 1000g	55
Obrázek 68: Graf závislosti axiální deformace (λ_{Z1}) na tlaku, kamera1, první a poslední cykly, všechna zatížení	56
Obrázek 69: Graf závislosti axiální deformace (λ_{Z2}) na tlaku, kamera2, první a poslední cykly, všechna zatížení	56
Obrázek 70: Graf závislosti obvodové deformace (λ_{T1}) na tlaku, kamera1, první a poslední cykly, všechna zatížení	57
Obrázek 71: Graf závislosti obvodové deformace (λ_{T2}) na tlaku, kamera2, první a poslední cykly, všechna zatížení	57
Obrázek 72: Schématické zobrazení ploch pod křivkami.....	58
Obrázek 73: Model numerické integrace lichoběžníkovou metodou [24].....	58

12 Použitá literatura

- [1] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. 1. vydání. Svitavy: Code Creator, s.r.o, 2015 [cit. 2019-02-23]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [2] VÁCLAV, Švorčík. Struktura a vlastnosti polymerů [online]. In: . Praha: FS ČVUT, b.r. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/Struktura%20a%20vlastnosti%20polymeru%20-%20strucne_Svorcik.pdf
- [3] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [4] *Courses Taught by Dr. Robert Droual at Modesto Junior College* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: droualb.faculty.mjc.edu/lecture%20notes/unit%204/cardiovascular-blood%20vessels%20with%20figures.htm
- [5] DYLEVSKÝ, Ivan. *Anatomie a fyziologie člověka – prof. MUDr. I.Dylevský, Dr.Sc* [online]. 7128. U Průhonu 22, Praha7: Grada publishing, 2017 [cit. 2019-03-06]. ISBN 978-80-271-2662-0. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?isbn=8027121116>
- [6] *Základy obecné anatomie a fyziologie* [online]. Brno: Neodkladná zdravotnická činnost, 2012 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/repository/vzdelavani/jednotky_sdh_obci/F_ZOP_JSDHO_cervenec_2014/3_PP_jakub_kr.ek/Ke_stazeni/3.Zaklady_anatomie_a_fyziologie.pdf
- [7] *Trávicí systém* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5686312/>
- [8] *Duté orgány* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://papu.ssss.cz/w/kc/pv/3/duteorg.htm>
- [9] KRAJÍČEK, Milan. *Filosofie a praxe cévních náhrad* [online]. 2008 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.tribune.cz/clanek/11776>
- [10] *Kanyly* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kanyla>
- [11] *Cévní chirurgie* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.vup.cz/cs/cevní-chirurgie/produkty/ra-k>
- [12] *ASKER* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.asker.cz/spotrebni-material-podani-kysliku/nosni-kanyla-kyslikove-bryle-pro-deti/>
- [13] *AUTO KELLY* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.autokelly.cz/Catalog/osobni-automobil-univerzalni-dily-spotrebni-material-palivove-hadice/39849642;38957081;40137078;40135461>
- [14] *Ascar tuning* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.ascartuning.cz/cz-detail-945426-palivova-hadice-8mm-modra-6-baru-role-25m.html>
- [15] *BM MOTO* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.bmmoto.cz/hadice-hadicky/hadice-k-ostrikovaci-5mm-role-25m?gclid=EAlalQobChMIjLWs_fHy4AIVqpztCh336gTkEAQYBCABEgIGN_D_BwE

- [16] HORNÝ, Lukáš. Úvod do nelineární pružnosti [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2016 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~hornyluk/files/Nelinearnipruznost-projekt-I.pdf>
- [17] HORNÝ, Lukáš. *PATOBIOMECHANIKA SRDEČNĚČEVNÍHO SYSTÉMU I. DÍL* [online]. České vysoké učení technické v Praze. Praha, 2014 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~hornyluk/files/Patobiomechanika-srdecnecevnih-systemu-I.pdf>
- [18] *Polární rozklad deformačního gradientu a tenzory přetvoření* [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/deformace_miry_pretvoreni.pdf
- [19] NOVÁK, Jakub. *Odhad parametrů hyperelastického materiálového modelu s využitím MKP* [online]. 2018 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/80615>. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D.
- [20] Ing. Milan Havel. *Jak třídíme plasty a jak se dále využijí?* [online]. 25. 2. 2016 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/2955.jak-tridime-plasty-a-jak-se-dale-vyuziji>
- [21] *Třídění a recyklace plastů* [online]. 10.09.2018 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/111584>
- [22] ŠANDOVÁ, Bc. Zdenka. *Testování materiálových vlastností polymerů vhodných pro potravinářský průmysl* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2019-04-22]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [23] MACHÁČ, MIROSLAV MACHÁČ. *MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. MILAN KALIVODA.
- [24] prof. RNDr. Josef Jančář, CSc. / Ing. Eva Nezbedová, CSc. *ZKOUŠENÍ PLASTŮ* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/E_Nezbedova/publication/40381569_Zkouseni_plastu/inks/59d5d4f20f7e9b7a7e49a177/Zkouseni-plastu.pdf
- [25] *Trapezoidal rule* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Trapezoidal_rule

