

Experimentální a modelové studium mechanického chování tlakových elastomerních pružin

Bc. David Jakubec

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. David JAKUBEC
Studijní program: N 3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

Téma práce: Experimentální a modelové studium mechanického chování tlakových elastomerních pružin

Zásady pro vypracování:

- 1.) Zpracujte literární rešerši k dané problematice
- 2.) Výroba zkušebních těles
- 3.) Experimentální studium mechanického chování elastomerních pružin v tlaku
- 4.) Sestavení modelových studií daných typů pružin
- 5.) Srovnání experimentálních a modelových výsledků

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

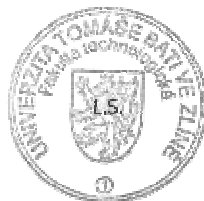
Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: 19. února 2010
Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2010

Ve Zlíně dne 21. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



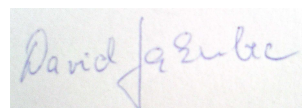
doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 19.5.2010



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studii tvarové funkce resp. tvarového faktoru tlakových pryžokovových pružných prvků.

V rámci studie mechanického chování elastomerních pružných prvků byla podrobená jednotlivá zkušební tělesa experimentálním zkouškám v tlaku. Dále byl proveden analytický výpočet tvarové funkce experimentu podrobených pružin, a také byla realizována simulace mechanických vlastností v tlaku pomocí konečně-prvkového programu Cosmos/M.

Klíčová slova: pryž, vulkanizace, elastomerní pružina, tvarový faktor, tvarová funkce

ABSTRACT

The graduation thesis is engaged in study of the shape function resp. the shape factor of the pressural rubber-metalic elastic elements.

Individual tested elements were taken in the experimental pressural examinations in the frame work in the study of the mechanical behaviour of the rubber elastic elements. Next the analytic calculation of the shape function were accomplished and also the simulation of the mechanical properties in pressure were realized by the finite element software Cosmos/M.

Keywords: rubber, vulcanization, elastomer spring, shape factor, shape function

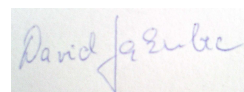
Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval v první řadě vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Oldřichu Šubovi, Csc. za odborné vedení, cenné rady, a příjemnou spolupráci při vypracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval pánům Ing. Vladimíru Šumberovi za pomoc při přípravě zkušebních těles pro mechanické zkoušky, panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při realizaci mechanických zkoušek, a také panu Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph. D. za pomoc při získání konstant pro nelineární mechanické analýzy.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 19.5. 2010.....



Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KAUKOVÁ SMĚS	13
1.1 KAUK.....	13
1.1.1 Přírodní kaučuk	14
1.1.2 Syntetické kaučuky.....	15
1.1.2.1 BR- polybutadienový kaučuk.....	15
1.1.2.2 IR- polyisoprenový kaučuk	16
1.1.2.3 SBR- polybutadien- styrenový kaučuk	17
1.1.2.4 EPDM- etylén- propylenový kaučuk.....	17
1.1.2.5 IIR- butyl kaučuk	18
1.1.2.6 CR- chloroprenový kaučuk (neopren).....	18
1.1.2.7 Q- silikonový kaučuk	19
1.1.2.8 NBR- akrylonitril- butadienový kaučuk.....	20
1.2 VULKANIZAČNÍ ČINIDLA	21
1.3 URYCHLOVAČE VULKANIZACE	21
1.4 AKTIVÁTORY VULKANIZACE	22
1.5 RETARDÉRY VULKANIZACE	23
1.6 ZMĚKČOVADLA	23
1.7 ANTIDEGRADANTY	23
1.8 NADOUVADLA	23
1.9 PIGMENTY	24
2 PŘÍPRAVA KAUKOVÉ SMĚSI	25
2.1 PLASTIKACE KAUKU	25
2.2 MÍCHÁNÍ KAUKOVÉ SMĚSI.....	26
2.2.1 Míchání kaučukové směsi na dvouválci.....	26
2.2.2 Míchání kaučukové směsi v hnětacím stroji	28
3 SKLADOVÁNÍ KAUKOVÝCH SMĚSÍ	30
3.1 SKLADOVÁNÍ.....	30
4 ZPRACOVATELNOST KAUKOVÝCH SMĚSÍ	32
4.1 VULKANIZAČNÍ KŘIVKA	32
4.2 VSKOZITA MOONEY	33
5 HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VULKANIZÁTŮ	35
5.1 STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ	35
5.1.1 Zkouška pevnosti v tahu/tlaku.....	35
5.1.2 Měření tvrdosti	36
5.1.2.1 Brinell	36

5.1.2.2	Vickers	37
5.1.2.3	Tvrdość Shore A a Shore D	38
6	HYPERELASTICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ	39
6.1	VELKÉ DEFORMACE	39
6.2	NEOHOOKEOVSKÝ POTENCIÁL DEFORMAČNÍ ENERGIE	41
7	PRYŽKOVOVÉ PRUŽNÉ PRVKY	45
7.1	CHARAKTERISTIKA PRUŽINY	45
7.1.1	Uspořádaní pružin vedle sebe	46
7.1.2	Uspořádaní pružin za sebou	46
7.2	PRYŽKOVOVÉ PRUŽINY	47
7.2.1	Lineárně smyková pružina- prvek namáhaný smykem	47
7.2.2	Rotačně- symetrická lineárně smyková pružina namáhaná axiální silou	49
7.2.3	Rotačně- smykový válcový prvek	51
7.2.4	Torzni pružina	54
7.2.5	Tlaková pružina	56
8	ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	61
II	PRAKTICKÁ ČÁST	62
9	STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	63
10	EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM ELASTOMERNÍCH PRUŽIN	64
10.1	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	64
10.2	TLAKOVÁ ZKOUŠKA	65
10.2.1	Výsledky tlakových zkoušek nevázaných plných válcových elastomerních pružin	67
10.2.2	Výsledky tlakových zkoušek vázaných plných válcových elastomerních pružin	72
10.2.3	Výsledky tlakových zkoušek nevázaných válcových elastomerních pružin s kruhovou dírou	78
10.2.4	Výsledky tlakových zkoušek vázaných válcových elastomerních pružin s kruhovou dírou	83
10.3	ZHDNOCENÍ VÝSLEDKŮ TLAKOVÉ ZKOUŠKY	89
11	ANALYTICKÉ ODVOZENÍ VZTAHU PRO VÝPOČET TVAROVÉ FUNKCE A TVAROVÉHO FAKTORU CYLINDRICKÉ VÁZANÉ ELASTOMERNÍ PRUŽINY S KRUHOVÝM OTVOREM	90
11.1	ZÁVĚR ANALYTICKÉHO ODVOZENÍ	93
12	ANALYTICKÝ VÝPOČET TVAROVÝCH FUNKCÍ A TVAROVÝCH FAKTORŮ PRUŽIN PODROBENÝCH EXPERIMENTU	94
12.1	VÝPOČET VÁZANÝCH PRUŽIN PLNÉHO PRŮŘEZU	95
12.2	VÝPOČET VÁZANÝCH PRUŽIN S KRUHOVÝM OTVOREM	97
13	MODELOVÉ STUDIUM ELASTOMERNÍCH TLAKOVÝCH PRUŽIN V PROGRAMU COSMOS/M	99

13.1	LINEÁRNÍ FEM MODELOVÁNÍ	99
13.1.1	Příprava před lineárním modelováním	99
13.1.2	Výsledky lineárního modelování tlakových pružin.....	100
13.2	SOUHRN A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z LINEÁRNÍCH ANALÝZ TLAKOVÝCH PRUŽIN.....	104
13.3	NELINEÁRNÍ FEM MODELOVÁNÍ	105
13.3.1	Příprava před nelineárním modelováním	106
13.3.2	Výsledky nelineárního modelování.....	108
13.4	NELINEÁRNÍ FEM MODELOVÁNÍ- NEOHOOKEOVSKÝ FEM MODEL	113
13.4.1	Příprava nelineárního(Neohookeovského) modelování.....	113
13.4.2	Výsledky nelineárního - Neohookeovského modelování.....	114
13.5	ZHODNOCENÍ NELINEÁRNÍHO MODELOVÁNÍ	119
14	SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH, ANALYTICKÝCH A MODELOVÝCH VÝSLEDKŮ	120
14.1	POROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO ŘEŠENÍ S ANALYTICKÝM VÝPOČTEM	120
14.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU A MODELOVÉHO ŘEŠENÍ – LINEÁRNÍ FEM.....	126
14.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU A MODELOVÉHO ŘEŠENÍ – NELINEÁRNÍ NEOHOOKEOVSKÝ FEM	133
14.4	POROVNÁNÍ NELINEÁRNÍ FEM A NELINEÁRNÍ NEOHOOKEOVSKÝ FEM	139
14.5	ZÁVĚR SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO, ANALYTICKÉHO A MODELOVÉHO STUDIA TLAKOVÝCH ELASTOMERNÍCH PRUŽIN.....	141
	ZÁVĚR	143
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	144
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	146
	SEZNAM OBRÁZKŮ	147
	SEZNAM TABULEK.....	151
	SEZNAM PŘÍLOH.....	154

ÚVOD

Pryž je v současné době jedním z velmi důležitých materiálů, a to především v oblastech, kde nelze použít jiný materiál. Vlastnosti pryžových výrobků jsou ceněny převážně tam, kde dochází ke statickému a dynamickému namáhání těchto konstrukčních prvků.

Tato diplomová práce se zabývá studiem pomocí experimentálního a modelového zkoumání tvarového faktoru pružných pryžových konstrukčních prvků. Jedná se konkrétně o elastomerní tlakové pružiny, které zaujímají v technické praxi nepostradatelnou úlohu.

Teoretická část této práce se zabývá pryží, jako konstrukčním materiálem, dále pryžokovovými konstrukčními prvky, tedy elastomerními pružinami z pohledu mechanického namáhání a dimenzování.

Praktická část popisuje výrobu zkušebních těles ve formě, dále experimentální mechanické zkoušky takto vyrobených zkušebních těles. Následně dojde k porovnání výsledků z experimentální části a části, kdy budou vytvořeny modely. Výsledky budou podrobeny diskuzi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KAUČUKOVÁ SMĚS

K výrobě funkčního pryžového výrobku vede velmi dlouhá a složitá cesta, která začíná konstrukcí samotného výrobku, dále nástroje (formy) pro jeho sériovou výrobu. Následně je nutné zvolit materiál, ze kterého bude výrobek vyroben, a také technologické podmínky a parametry, kterými se bude výroba řídit.

Základní komponentou pro výrobu elastomerních výrobků je kaučuková směs, která také v některých případech bývá nazývána jako gumárenská, případně elastomerní směs.

Skladba směsi je pro konkrétní pryžové výrobky a jejich následné používání v praxi přesně definována. Tato definice je určena množstevním zastoupením jednotlivých složek směsi. Množství je udáváno v jednotkách **dsk**, což znamená zastoupení jednotlivé složky směsi na sto dílů kaučuku. Lze tedy říci, že kaučuková směs je složená z hlavní polymerní složky, tedy elastomeru(kaučuku) a ostatních přísad(viz tabulka 1).

Při volbě kaučuku je tedy nutno brát zřetel především na zpracovatelské vlastnosti kaučuky, a to především rozsah teplot zpracování kaučuku, které je možno najít v literatuře například různých podnikových analýz. Zpracovatelské vlastnosti kaučuků jsou určeny především jejich průměrnou molekulovou hmotností, distribucí a strukturou. [1], [2], [12]

	Množství[dsk]
Kaučuk	100
Vulkanizační činidla	0-4
Aktivátory vulkanizace	5
Zpracovatelské přísady	5
Urychlovače vulkanizace	0,5-3
Antidegradanty	1-3
Plniva	0-150
Změkčovadla	0-150

Tab. 1. Složení kaučukové směsi

1.1 Kaučuk

Základním polymerem pro výrobu gumárenské směsi je kaučuk, který může být použit ve formě **přírodní**, nebo ve formě **syntetické**, případně může být při tvorbě směsi zvolena kombinace přírodního a syntetického kaučuku, a to především z toho důvodu, že každý jednotlivý polymer (elastomer) má minimálně jednu výbornou vlastnost, ale na druhou

stranu může vykazovat i určité negativní rysy. Z tohoto důvodu se s výhodou používá směs různých polymerů, aby bylo dosaženo kýžených vlastností u budoucího výrobku.[3], [10]

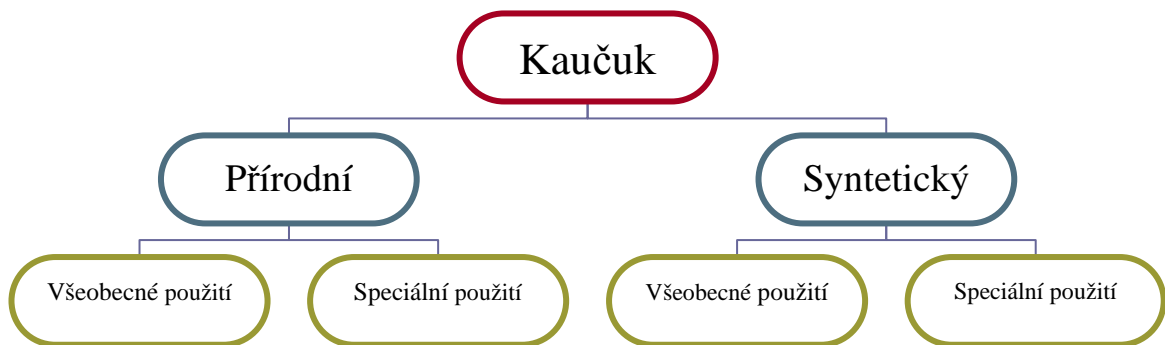


Diagram 1- Rozdělení kaučuků

1.1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk lze získat jak název napovídá z přírodních zdrojů. Konkrétně se jedná o tzv. čepování latexu ze stromů *Hevea Brasiliensis*, které se vyskytují především na plantážích v Malajsii a Indonésii.

Takto čepovaný **latex** lze tedy definovat jako disperzi kaučukových částic ve vodném prostředí. Kaučuk se z latexu vysráží pomocí kyseliny mravenčí.

Vysrážený kaučuk se následně propírá na rýhovaných dvouválcích pomocí vody, následuje zbavení nečistot a získání souvislé vrstvy kaučuku. Dále dochází k sušení, a to pomocí teplého vzduchu (bílá krepa) nebo dýmu (hnědá krepa či uzený kaučuk). [10], [11], [12]

Značení přírodního kaučuku

PK- Přírodní Kaučuk

NR- Natural Rubber

SMR- Standard Malaysian Rubber

SIR- Standard Indonesian Rubber

SMR 10- přírodní kaučuk pocházející z Malajsie, který obsahuje 1% nečistot.

Při získání přírodního kaučuku výše popsanou cestou vždy zůstane určité množství nečistot, které je vyjádřeno v procentech a je obsaženo v názvu kaučuku.[10]

Vulkanizace

Vulkanizace je chemicko-tepelný proces, kdy se z materiálu plastického stává materiál elastický. Dojde tedy ke vzniku příčných vazeb mezi makromolekulami, a to zahřátím materiálu na vulkanizační teplotu při působení tlaku po dobu vulkanizace.[1], [12]

Vulkanizačním činidlem přírodního kaučuku je síra.[10]

Vlastnosti přírodního kaučuku

- Výborné mechanické vlastnosti
- Výborná odolnost proti oděru [10], [11]

Použití přírodního kaučuku

- Výroba nákladních plášťů
- Výroba leteckých plášťů
- Výroba plášťů pro sportovní vozidla
- Výroba dopravních pásů [10], [11], [12]

1.1.2 Syntetické kaučuky

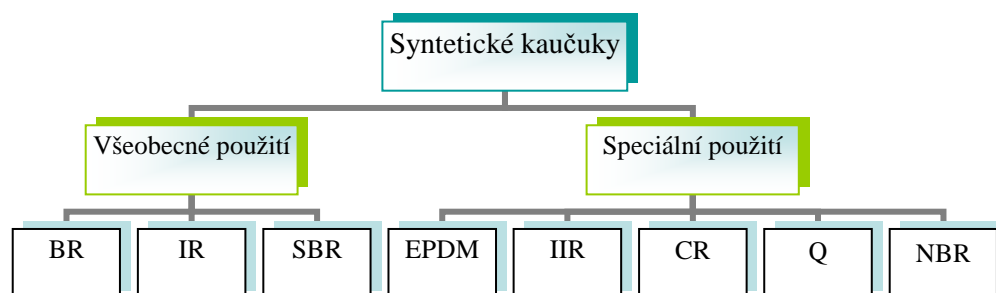


Diagram 2- Rozdělení syntetických kaučuků

1.1.2.1 BR- polybutadienový kaučuk

Tento kaučuk je představitelem kaučuku pro všeobecné použití. Jedná se o historicky první synteticky vyrobený kaučuk, jehož struktura je velmi podobná kaučuku přírodní-

mu. Vyrábí se především roztokovou polymerací pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů, kdy vznikají produkty s vysokým podílem 1,4-butadienových jednotek.[1], [10], [12]

Vulkanizace BR

Vulkanizace probíhá pomocí síry.

Vlastnosti BR

- Výborné dynamické vlastnosti
- Výborná odolnost proti oděru a vzniku trhlin
- Často se kombinuje s přírodním kaučukem

Použití BR

- Výroba nákladních pláštů
- Výroba osobních pláštů
- Výroba dopravních pásů [10], [11], [12]

1.1.2.2 IR- polyisoprenový kaučuk

Jedná se o syntetický kaučuk pro všeobecné použití, který je strukturně velmi podobný kaučuku přírodnímu, v některých případech jsou pro určité aplikace zaměnitelné.

Jeho výroba se děje emulzní polymerací, vykazuje vysokou pevnost v tahu stejně jako kaučuk přírodní, protože krystalizuje tažením za pracovních teplot.[1], [2], [12]

Vulkanizace IR

Vulkanizace je realizována pomocí síry.

Vlastnosti IR

- Výborné dynamické vlastnosti
- Výborná odolnost proti oděru
- Odolnost proti stárnutí

Použití IR

- Výroba nákladních pláštů
- Výroba osobních pláštů [10], [11], [12]

1.1.2.3 SBR- polybutadien- styrenový kaučuk

Jedná se o univerzální kaučuk, který je v současné době nejpoužívanějším kaučukem pro výrobu pneu. Je vyráběn kopolymerací butadienu a styrenu, a dále emulzní polymerací.[10], [12]

Vulkanizace SBR

Vulkanizačním činidlem je v tomto případě síra.

Vlastnosti SBR

- Vysoká odolnost proti oděru
- Výborné dynamické vlastnosti
- Lze kombinovat s NR, BR, IR

Použití SBR

- Výroba běhounů pneumatik
- Výroba technické pryže
- Kably, manžety
- Transportní pásy [10]

1.1.2.4 EPDM- etylén- propylenový kaučuk

EPDM je jedním z kaučuků pro speciální použití. Je vyráběn kopolymerací etylénu a propylenu. Jeho vlastnosti jsou velmi podobné SBR, NR a BR. [10]

Vulkanizace EPDM

Vulkanizace probíhá pomocí peroxidů či organických pryskyřic.[11]

Vlastnosti EPDM

- Výborné dynamické vlastnosti
- Vysoká odolnost proti stárnutí
- Vysoká odolnost vůči chemikáliím
- Vysoká odolnost vůči trvalé deformaci

Použití EPDM

- Výroba těsnících prvků (např. těsnění do oken)
- Výroba technické pryže [10],[11]

1.1.2.5 IIR- butyl kaučuk

IIR je kaučuk pro speciální použití, který je vyráběn kopolymerací isobutylénu a isoprenu. [10], [11]

Vulkanizace IIR

Vulkanizace se provádí pomocí síry či pryskyřice.

Vlastnosti IIR

- Výborná odolnost proti pronikání plynů
- Dobré dielektrické vlastnosti
- Za běžných podmínek při 25°C teče, špatně se plastikuje [10], [11]

Použití IIR

- Výroba duší a membrán
- Výroba izolační vrstvy u pneumatik
- Výroba ochranných masek
- Pružná uložení [10]

1.1.2.6 CR- chloroprenový kaučuk (neopren)

Jedná se opět o kaučuk pro speciální použití, jehož výroba je realizována emulzní polymerací. [10], [11]

Vulkanizace CR

Vulkanizačními činidly CR jsou oxidy kovů, konkrétně se jedná o MgO a ZnO. [10]

Vlastnosti CR

- Odolnost proti oxidaci

- Malá hořlavost
- Vysoká odolnost proti anorganickým látkám [5], [10], [11]

Použití CR

- Výroba meteorologických balónů
- Výroba těsnění
- Neopren jako textilie- potápěči [10]

1.1.2.7 Q- silikonový kaučuk

Q je kaučukem pro speciální použití, který je vyráběn alkalickou polymerací. Má velmi široké spektrum použití, protože se jedná o extrémně odolný typ kaučuku. Nachází se trvale v plastickém stavu. [5], [10]

Vulkanizace Q

Vulkanizace probíhá pomocí anorganických peroxidů. [10]

Vlastnosti Q

- Výborná odolnost proti oxidaci
- Velmi malá hořlavost
- Odolnost proti extrémně nízkým a vysokým teplotám
- Šetrný vůči lidskému organismu

Použití Q

- Výroba lepidel a tmelů
- Izolace kabelů
- Trubičky v automobilovém průmyslu (odolné proti vysokým teplotám)
- Potřeby pro medicínu- implantáty, katétry [10], [11]

1.1.2.8 NBR- akrylonitril- butadienový kaučuk

Typ kaučuku pro speciální použití, který je vyráběn emulzní polymerací či kopolymerací akrylonitrilu a butadienu. Čím více obsahuje struktura akrylonitrilu, tím více je odolný proti látkám ropného původu. [5], [10], [11]

Vulkanizace NBR

NBR je vulkanizován pomocí síry. [10]

Vlastnosti NBR

- Výborná odolnost proti zvýšeným teplotám
- Odolnost proti působení ropných látek

Použití NBR

- Hadice na dopravu ropných látek a olejů
- O-kroužky
- Těsnění
- Tlumící elementy [10], [11]

1.2 Vulkanizační činidla

Vulkanizace je proces, kdy dochází k vytváření příčných chemických vazeb mezi jednotlivými molekulami kaučuku, kdy primárním cílem je zamezit toku molekul vzhledem k sousedním molekulám. A tedy dostačující je, aby bylo vytvořeno malé množství těchto příčných vazeb, a tím bylo zamezeno samovolnému pohybu jednotlivých molekul.

Vlastnosti kaučuku se po vulkanizaci mění, dochází k transformaci ze stavu plastického do stavu elastického, zlepšují se vlastnosti jako pevnost, odrazová pružnost, odolnost proti nízkým a vysokým teplotám, roste tvrdost a modul, snižuje se tažnost a trvalá deformace. [1], [2], [12]

Látky, které mají schopnost vytvářet chemickou reakcí příčné vazby mezi molekulami kaučuku se nazývají vulkanizační činidla. [1], [12]

Mezi nejběžněji používaná vulkanizační činidla patří: síra, donory síry, peroxidy, oxidy kovů, selen, telur a reaktivní pryskyřice. [1], [3]

Aby nedošlo k inicializaci vulkanizace, a s tím souvisejícímu předčasnému ztvrdnutí, jsou vulkanizační činidla přidávána do kaučukové směsi až v konečné fázi přípravy kaučukové směsi. [1]

<u>Typická vulkanizační činidla:</u>	<u>Kaučuky:</u>
Síra a donory síry	dienové kaučuky
Organické peroxidy	EPM, EVAc, PVC/NBR, Q, PU,...
Oxidy kovů	CR, CSM, ...
Organické aminy	ACM, CO, ECO, FPM,...
Fenolické pryskyřice	IIR, BIIR, CIIR

Obr. 1. Nejpoužívanější vulkanizační činidla[8]

1.3 Urychlovače vulkanizace

Urychlovače vulkanizace slouží k usnadnění chemické reakce mezi sírou a kaučukem, a tím pádem umožňují síru dávkovat v přesném vypočteném množství. Vulkanizační doba se při použití urychlovačů do systému zkracuje na minimum, což vede ke značným úsporám energetickým, finančním a také časovým a ke zvýšení efektivity výroby. [1], [5]

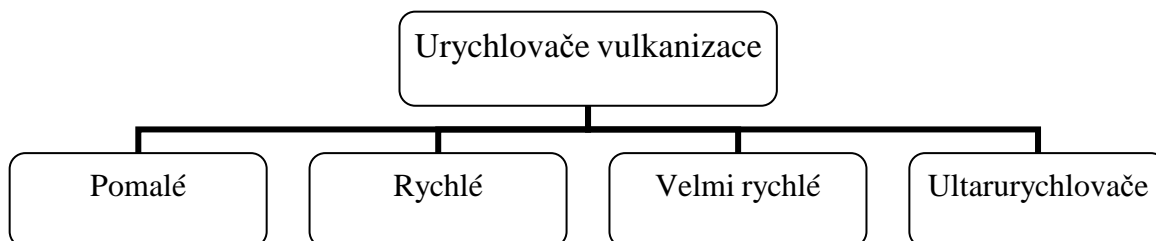


Diagram 3- Základní rozdělení urychlovačů vulkanizace

Obecně platí, že čím je urychlovač aktivnější, tím menší množství se do směsi přidává, tím menší množství síry vyžaduje a tím nižší teploty je třeba k dosažení optimálních vlastností pryže. Výběr urychlovače závisí na řadě okolností. Především na použitém elastomeru, dále na složení směsi, uvažované technologii vulkanizace a na požadovaných vlastnostech pryže. [1], [7], [12]

1.4 Aktivátory vulkanizace

Aktivátory vulkanizace jsou, jak již sám název napovídá, látky které „aktivují“ proces vulkanizace. Bez přídavku aktivátorů by byla například síra velmi málo účinným vulkanizačním činidlem, tento problém by bylo možno řešit přidáním síry jako vulkanizačního činidla.[1], [9]

Aktivátory jsou přidávány do směsi z toho důvodu, aby bylo dosaženo zvýšení síťovací účinnosti vulkanizačního systému. [12]

Většina urychlovačů vulkanizace vyžaduje přítomnost aktivátorů vulkanizace, které umožňují jejich plnou účinnost. Jako aktivátory jsou zastoupeny oxidy některých kovů, mastné kyseliny, které jsou schopny převádět oxidy na dobře rozpustné sloučeniny v kaučuku, například ve většině případů se do směsi přidává kyselina stearová a jako aktivátor je zde zastoupen oxid zinečnatý (ZnO), a následně kyselina stearová vytvoří s oxidem stearan zinečnatý.

Jako aktivátorů vulkanizace lze použít oxidů kovů jako: **MgO, ZnO, CaO, PbO**. [1], [12]

1.5 Retardéry vulkanizace

Látky, které chrání kaučukovou směs před předčasným navulkanizováním se nazývají retardéry vulkanizace. K předčasnému navulkanizování může dojít v průběhu transportu, skladování, míchání, případně při dalším zpracování.[1], [3]

1.6 Změkčovadla

Změkčovadla jsou látky, které usnadňují zpracovatelnost kaučukové směsi a současně zvyšují její plasticitu. Usnadňují vmíchávání práškových přísad do tuhého kaučuku, a navíc zlepšují zpracovatelnost pro následné technologické operace jako jsou válcování, vytlačování, vstřikování. Nevýhodou v tomto případě je, že při přidávání změkčovadla dojde ke zhoršení mechanických vlastností pryže. Při vyšším dávkování plniv dochází již v nezvulkanizovaném stavu, k tomu, že směs bude velmi obtížně zpracovatelná, a tak je nutné přidat změkčovadlo. Jedním z nejznámějších změkčovadel jsou minerální oleje. [1], [3], [12]

1.7 Antidegradanty

Látky, které chrání budoucí elastomerní výrobek před škodlivými vlivy kyslíku, ozonu a dalších nepříznivých vlivů, kterým musí pryžový výrobek odolávat při nasazení v technické praxi se souhrnně nazývají antidegradanty.

Antidegradanty se dělí na antiozonanty a antioxidanty, jejich samotný název sám napovídá, před jakými vlivy chrání, a tedy antiozonanty chrání před nepříznivými vlivy ozonu a antioxidanty chrání před působením kyslíku ze vzduchu.

Pokud by nebylo přidáváno určité množství antidegradantů do kaučukové směsi, docházelo by k předčasnému stárnutí výrobku, a tedy primárním úkolem antidegradantů je přinejmenším zpomalit a v ideálním případě úplně zastavit proces stárnutí pryže. [1], [5],[12]

1.8 Nadouvadla

Nadouvadla jsou velmi specifickou přísadou kaučukové směsi. Používají se v případech, kdy je žádoucí vytvořit lehčenou strukturu pryže. Nadouvadla jsou látky, které se při působení vyšších teplot rozkládají za vzniku většího objemu plynů. [12]

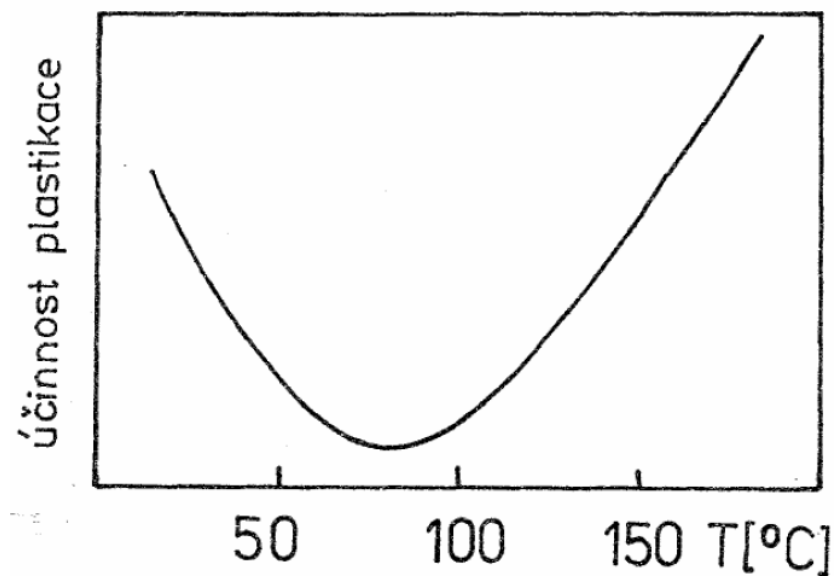
1.9 Pigmenty

Pigmenty jsou dekorační látky, které způsobují zbarvení budoucího pryžového výrobku. Jsou rozděleny do dvou základních skupin, a to na pigmenty organické a anorganické. Organické pigmenty jsou finančně nákladnější než pigmenty anorganické. [1], [12]

2 PŘÍPRAVA KAUČUKOVÉ SMĚSI

2.1 Plastikace kaučuku

Plastikaci kaučuku lze chápat jako předpřípravu definovaného množství kaučuku, který bude následně určen pro přípravu kaučukové směsi. Plastikace je nutná především z toho důvodu, aby byl kaučuk schopný přijímat další přísady, které tvoří kaučukovou směs, a dále aby jej bylo možné zpracovat danou technologií. Principem plastikace kaučuku je snížení jeho molekulové hmotnosti, aby byl zlepšen průběh následných technologických operací. [12], [18]



Obr. 2. Účinnost plastikace v závislosti na teplotě [4]

Vlastní plastikace je realizována pomocí strojního zařízení, kdy proces plastikace je energeticky velmi náročný.

Děje se tak především na dvouválci za intenzivního chlazení, nebo v hnětacím stroji za zvýšené teploty. [1], [3], [12],[18]

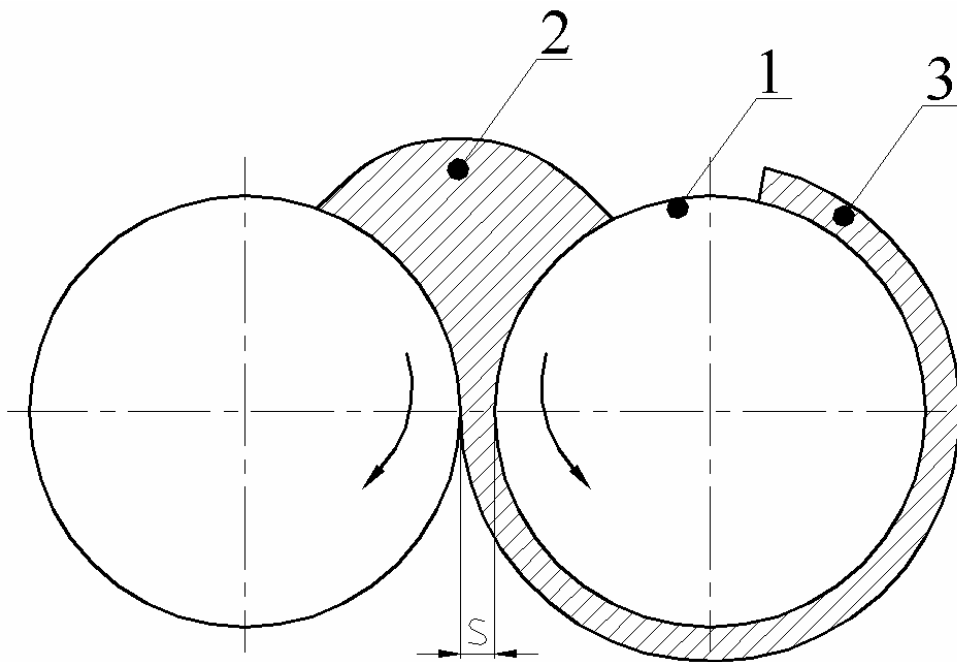
2.2 Míchání kaučukové směsi

Mícháním kaučukové směsi se rozumí proces, kdy jednotlivé složky směsi jsou smíchány dohromady. Děje se tak dvěma základními způsoby, a to na dvouválciích a v hnětačích strojích.[18]

2.2.1 Míchání kaučukové směsi na dvouválci

V případě dvouválců jde o kontinuální míchání směsi, kdy se využívá skluzu válců v poměru 1:1,2- 1:1,5, pro syntetické kaučuky s malou pevností se používá skluzu menšího.[13], [18]

Kaučuk je tedy vkládán mezi válce, kdy při válcování vytvoří opásání, což je souvislá vrstva materiálu, jejíž doprava je realizována přímo na válce, případně přes pomocné válečky do štěrbiny skusu. Do tuhého kaučuku jsou následně přidávány maziva ke snížení tření, kalafuna a případně regenerát. [12], [13]



Obr. 3. Schéma míchání na dvouválci [13]

1- válec, 2- návalek, 3- opásání, s- štěrbina skusu

Válce jsou konstrukčně uzpůsobené tak, aby byla zajištěna temperace, v nejobvyklejší formě pro chlazení vodou či vyhřívání párou. Tohoto je docíleno navrtáním kanálků pod povrchem válců. [12], [13],[18]

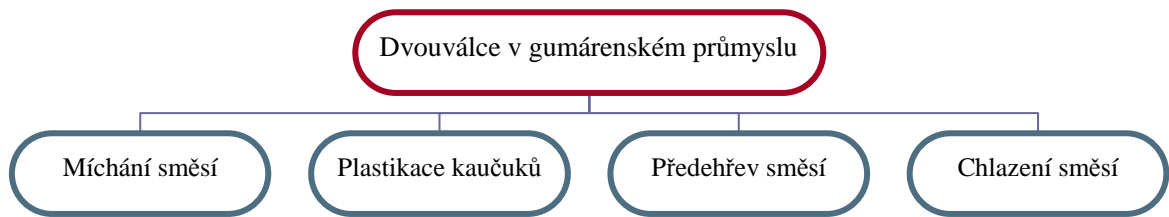
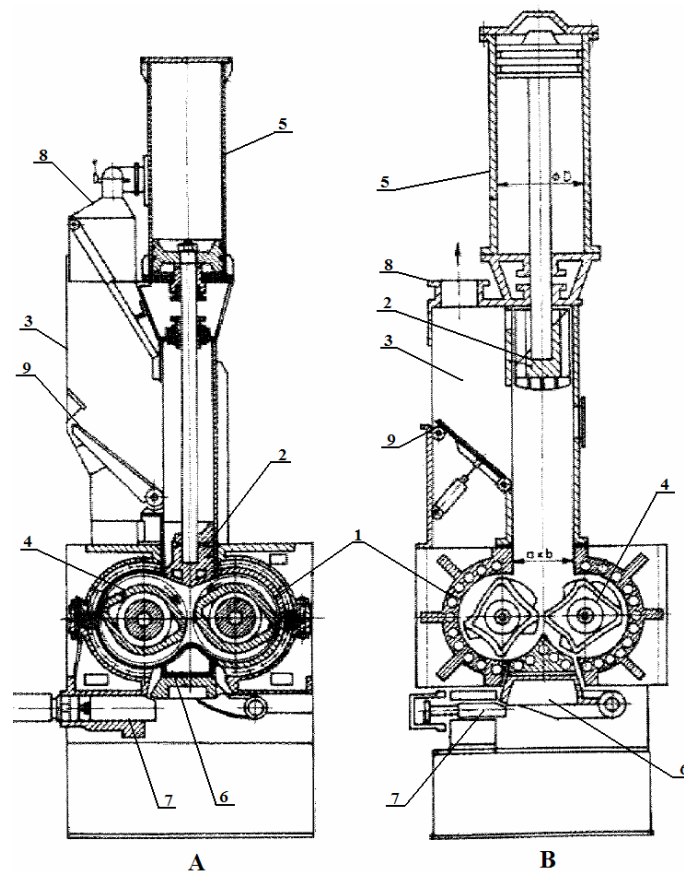


Diagram 4- Použití dvouválců v gumárenském průmyslu

Při procesu míchání kaučukové směsi je přední pracovní válec obepnut kaučukovou pláští. Zadní válec je v tomto případě volný, a jeho rychlost je vyšší než v případě válce předního. Vytvoření návaleku způsobuje skutečnost, že šířka štěrbiny skusu, je co se objemu týče, menší než objem dávky kaučuku. Návalek je tedy při míchání velmi důležitou součástí, protože se při míchání otáčí, strhává s sebou přidávané přísady kaučukové směsi, a tím pádem způsobuje intenzivní vmíchávání jednotlivých přísad do kaučukové směsi.

K dokonalé homogenizaci směsi je nutné prokrajování a překládání plástu směsi. V technické praxi je nutné být při práci s dvouválcem velmi obezřetný! [1], [2], [12],[18]

2.2.2 Míchání kaučukové směsi v hnětacím stroji



Obr. 4. Hnětací stroje[13]

A- dvojbřité rotory, B- čtyřbřité rotory

1- komora, 2- klát, 3- násypka, 4- rotor, 5- pneumatický válec,

6- odklopný uzávěr, 7- závora, 8- odsávání, 9- dvířka

Se zvyšujícími se nároky gumárenského průmyslu na výrobu kaučukových směsí došlo k uplatnění hnětacích strojů. Příčinou bylo především nasazení syntetických kaučuků do procesu výroby. Při míchání kaučukových směsí, jejichž základem je syntetický kaučuk je nutné, aby míchací stroje byly schopny odolávat především vyššímu tlaku a teplotě při míchání, protože syntetické kaučuky vykazují vyšší teplotu při míchání a také jsou tužší.

Kaučuková směs při míchání v hnětacích strojích je promíchávána mezi hnětadly, což jsou míchací elementy hnětacích strojů, a stěnou komory hnětacího stroje(viz obrázek 4, pozice 1). [1], [2], [12], [13],[18]

Dostatečná účinnost procesu homogenizace je silně závislá na :

- Naplnění míchací komory
- Tlaku přítlačného uzávěru
- Frekvenci otáčení hnětadel
- Teplotě míchání
- Době míchání

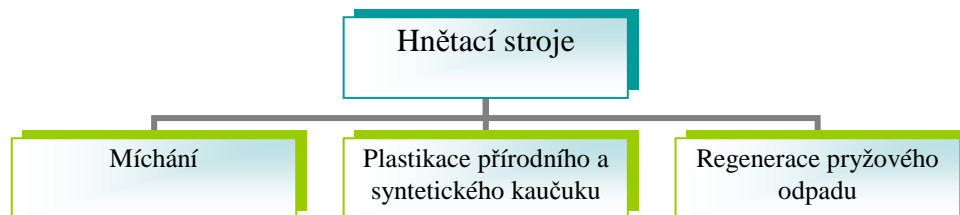


Diagram 5- Použití hnětacích strojů v gumárenském průmyslu

Pro zefektivnění procesu výroby a kaučukových směsí její automatizaci bývají hnětací stroje zařazeny do výrobních linek. [12],[18]

3 SKLADOVÁNÍ KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ

3.1 Skladování

Po smíchání kaučukové směsi dochází na lince s víceválcí k rozválcování vyrobené směsi na podobu pásu (plástve) a při výstupu z linky probíhá skládání na paletu. Při skládání je nutné, aby jednotlivé vrstvy byly proloženy z důvodu lepivosti směsi, jinak by byla směs obtížně vzájemně oddělitelná pro další zpracování. Takto vytvořená směs, která se následně skladuje ještě neobsahuje vulkanizační systém, ten je přidáván až při opětovném míchání směsi, kdy je již směs začleněna do výrobního procesu pro výrobu vulkanizátu.[1]

Po takovémto naskládání na paletu je nutné opatřit paletu se směsí popisem (**dokumentace směsi**), neboli průvodkou. Průvodka obsahuje datum míchání směsi, odběratele směsi, jméno člověka který směs míchal, složky směsi zda se bude jednat například o směs běhounovou atd..., a tedy označení směsi dle normy. Dále průvodka obsahuje datum spotřeby směsi.[1],[2]

Takto označená směs se na paletě odváží do skladovacích prostor firmy pomocí elektrických vozíků, případně vozíků manuálních.

Protože je směs složena z polymerních materiálů, které velmi reagují na teplotu, tlak, vlhkost, tak je nutné zajistit, aby byl sklad klimatizovaný a výše napsané veličiny byly dodržovány dle požadavků na konkrétní typ směsi.[2]

Velmi důležité je také dodržet podmínky následného odběru směsí nebo, také to lze považovat za pořadí pro budoucí zpracování, a tedy systém nazývaný **FI FO**. [2]

FI FO je zkratka, která znamená **F**irst **I**n, **F**irst **O**ut, a tedy v doslovném překladu z angličtiny „první dovnitř první ven“. Při dodržení tohoto postupu skladování je tedy eliminována situace, kdy by se mohlo stát, že jedna směs bude mít dobu skladování například 3 měsíce a jiná směs týden, což by bylo nevhodné.[1]

Dále je při fyzickém skladování směsi nutné brát zřetel na mechanizaci výrobního podniku, a tedy možnost exportu směsi ze skladu. Tím lze říci, že jednotlivé palety by neměly být umístěny těsně vedle sebe, ale měly by mezi nimi být dostatečné mezery pro bezproblémový převoz. S tím také souvisí prostor pro laboranty, kteří provádějí před samotným uvolněním směsi do výroby zkoušky zpracovatelnosti na malých vyseknutých vzor-

cích z příslušné směsi, která je testována a následně bude uvolněna do výroby, a tedy potřebují volný průchod mezi jednotlivými paletami.[1],[12]

Při pohybu osob v takovýchto prostorech musí být osoby poučeny o pohybu ve skladech, dále je nutné, aby při umístění většího množství směsi na paletě byla směs zajištěna a byla tak eliminováno riziko sesuvu směsi, případně ohrožení zdraví lidí, kteří se ve skladu pohybují.[12]

Dalším velice důležitým kritériem na sklady je protipožární opatření, které je pro takto rizikové prostředí dáno normou.[1],[2]

Směs je tedy uskladněna ve skladovacích prostorech firmy, a dochází k tzv. „odležení“ směsi před samotným uvolněním směsi pro další zpracování a finální výrobu vulkanizátu. [1]

Takovéto odležení, je z hlediska následného zpracování kaučukových směsí v hotový výrobek, tedy vulkanizát, velmi důležité, především z toho důvodu, že při samotném míchání směsi před skladováním vznikne ve směsi nerovnováha struktury makromolekul jednotlivých komponent kaučukové směsi, a skladování slouží k vyrovnání takto vzniklé nerovnovážné struktury. [1], [2], [12]

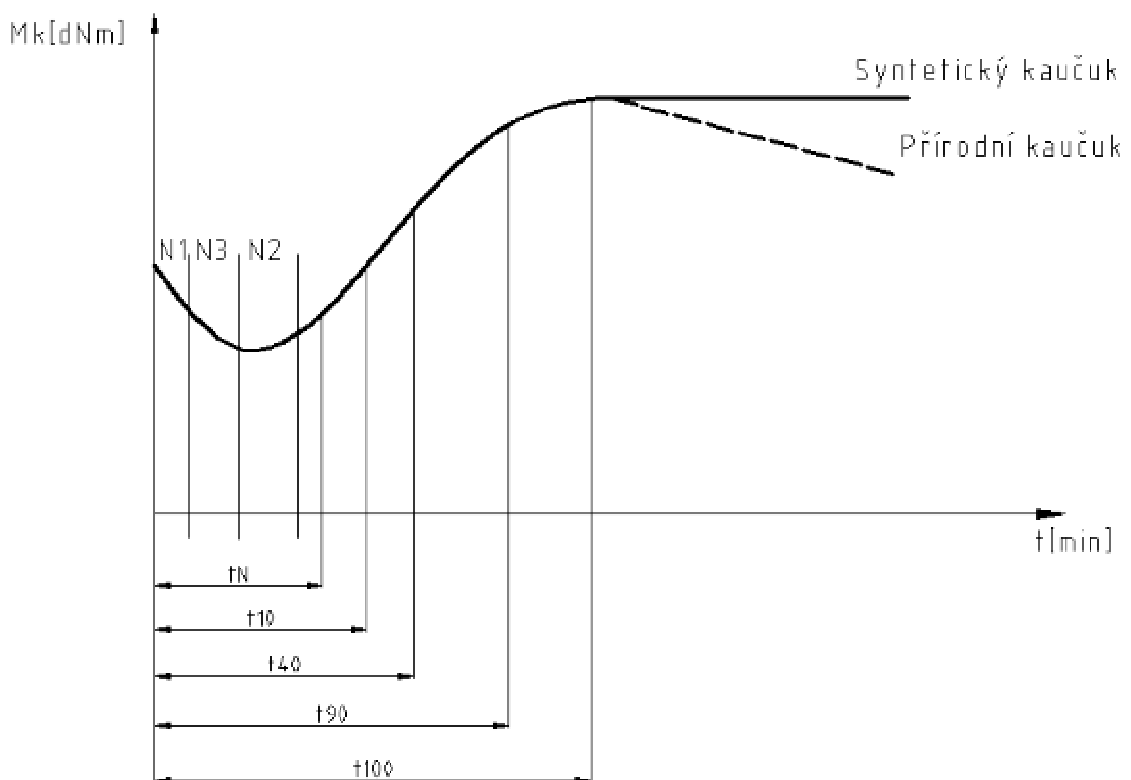
4 ZPRACOVATELNOST KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ

Zpracovatelské vlastnosti vyrobené směsi jsou hodnoceny před samotným skladováním ke zjištění vlastností, a před uvolněním směsi do další výroby je nutné směs odzkoušet znovu a následně porovnat vyhodnocené výsledky před skladováním a po skladování, a zjistit tak, pokud si směs zachovala požadované vlastnosti pro její budoucí použití.

Před samotným uvolněním směsi ze skladu do výroby se u směsí tedy určuje vulkanizační křivka na vulkametru a viskozita Mooney.

Je ovšem nutné podotknout, že při stanovení Mooney viskozity je viskozita měřena při smykové rychlosti, která leží hluboko pod hodnotami odpovídajícími zpracovatelským procesům jako je vytlačování a vstřikování. [11], [12]

4.1 Vulkanizační křivka



Obr. 5. Vulkanizační křivka[12]

Legenda:

N1- interval použitelný pro skladování

N2- interval „technologické“ jistoty

N3- interval vhodný pro vytlačení polotovaru

tN- bezpečnost (materiál není z vulkanizovaný- nic se neděje)

t10- množství vytvořených příčných vazeb, který nedovolí vratný děj (10% vulkanizace materiálu)

t40- 40% vulkanizace materiálu (40% příčných vazeb), výrobek se „nezbortí“

t90- 90% příčných vazeb, vytahujeme výrobek z formy, tepelná kapacita pryže je vysoká, a tak výrobek dovulkanizuje vně formy sám

t100- 100% vytvořených příčných vazeb [11], [12]

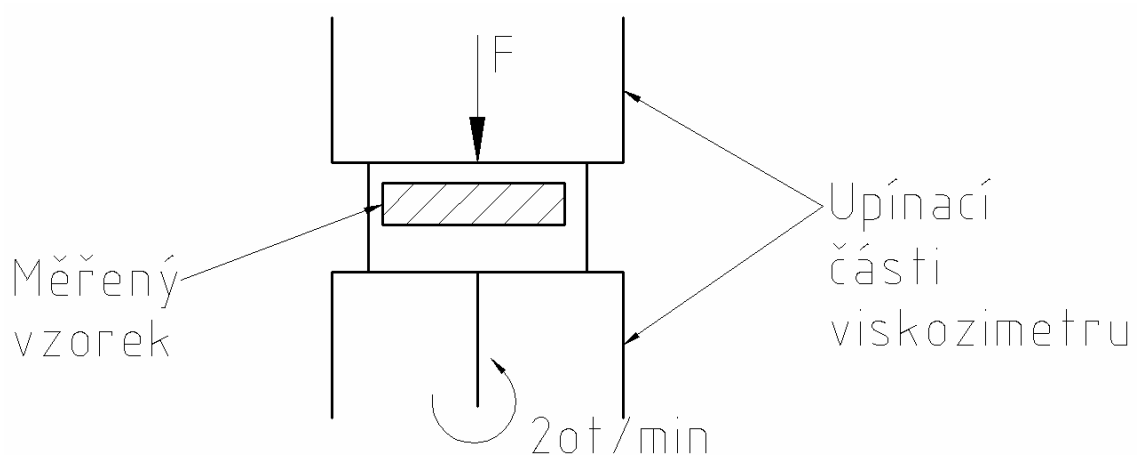
4.2 Viskozita Mooney

Mooney viskozita je viskozita materiálu, která se stanovuje tak, že po přehřevu při 100°C (temperaturi vzorku) po dobu jedné minuty následuje otáčení rotoru viskozimetru rychlostí 2 otáčky za minutu a po dobu čtyř minut dochází k měření a vyhodnocení Mooney viskozity. [8],[11]

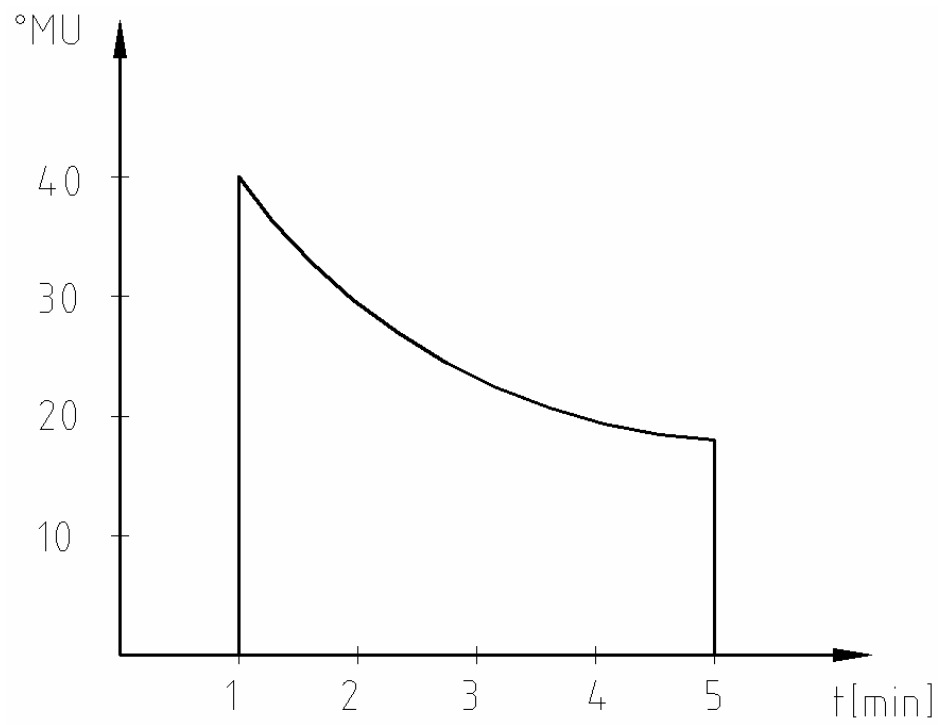
Jednotka je °MU= stupeň Mooney units(jednotek)

Vzorec

$$^{\circ}MU(1+4)^{100}$$



Obr. 6. Schéma měření Mooney viskozity [11]



Obr. 7. Přibližný grafický výsledek Mooney viskozity [11]



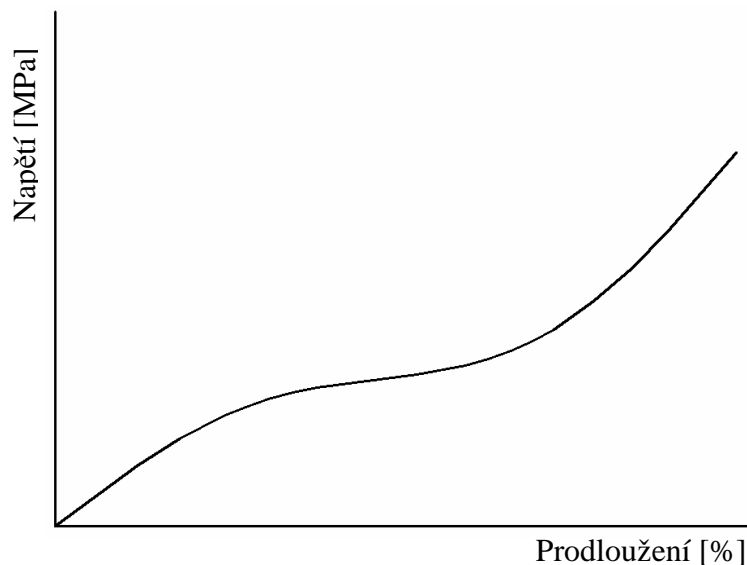
Obr. 9. Viskozimetr Mooney od firmy Alpha Technologies

5 HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VULKANIZÁTŮ

5.1 Statické zkoušky krátkodobé

5.1.1 Zkouška pevnosti v tahu/tlaku

Zkouška pevnosti v tahu/tlaku je jedna ze statických krátkodobých zkoušek, která je realizována pomocí normalizovaných zkušebních těles, v našem případě z pryžového materiálu, na trhacích strojích. Zkušební těleso je přesně definovaného tvaru a rozměrů, nejčastěji je používána oboustranná lopatka tzv. „osmička“, jejíž maximální tloušťka je 2 mm, délka pracovních částí lopatky činí 25 mm a šířka 6mm. Takto připravené zkušební těleso je upnuto mezi čelisti trhacího stroje a následně je natahováno/ stlačováno konstantní rychlostí, a je zaznamenáván průběh změny sledované fyzikální hodnoty.[8],[9], [11], [15]



Obr. 10. Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [9], [11]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

σ [MPa]..... smluvní napětí stanovené z podílu F a S

F[N]..... zatěžující tahová/tlaková síla

S[m²]..... původní průřez zkušebního tělesa

Při tahové/tlakové zkoušce dojde tedy k protažení/stlačení zkušebního tělesa o určité délku, která bývá označována jako Δl , a je měřena v metrech. Tato hodnota je rozdílem

délky l pracovní části zkušebního tělesa po prodloužení a délky původní pracovní části před zkouškou. [8],[9], [15]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (2)$$

ε [%]..... poměrné prodloužení/stlačení zkušebního tělesa

Δl [m] rozdíl délky po protažení/stlačení a délky původní

l_0 původní délka pracovní části zkušebního tělesa

Ze zkoušky pevnosti v tahu/tlaku vyvstávají následující pojmy jako je pevnost v tahu, což je síla vztažená na jednotku průřezu, a tedy vyjadřuje napětí potřebné k přetržení zkušebního tělesa.

Dále zde hraje velmi významnou roli tzv. tažnost, což je procentuální hodnota protažení při přetržení zkušebního tělesa.[8],[9], [11], [15]

5.1.2 Měření tvrdosti

5.1.2.1 Brinell

Stanovení tvrdosti podle Brinella je vhodné především pro měření tvrdosti tuhých polymerů, kdy toto měření vychází ze stanovení tvrdosti v případě kovů.

Podstata zkoušek spočívá ve vlačování kovové kuličky, kdy se vytvoří vtisk a je měřena hloubka vlačení kuličky. Je nutné dodržet přesně specifikované podmínky zkoušky, mezi které patří konstantní zatížení a konstantní průměr kuličky.[8], [11]

Podmínky zkoušky:

Průměr kuličky:

3mm - lamináty

5mm - většina plastů

10mm - měkčené PVC

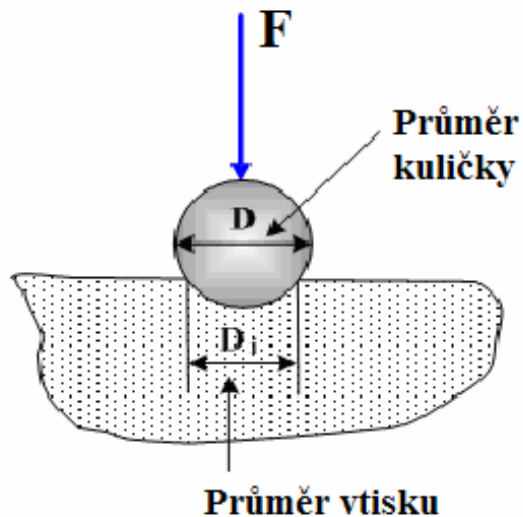
Působící síla:

50N - tvrdost do 200MPa

250N - tvrdé materiály

Doba měření:

10, 30 a 60 sekund

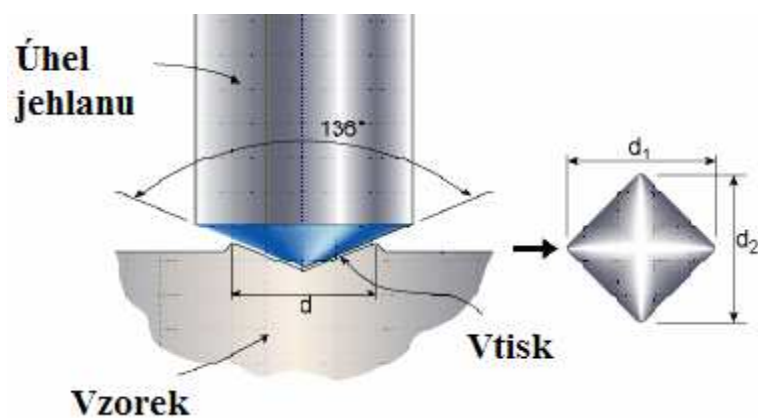


Obr. 11. Zkouška tvrdosti podle Brinella [11]

5.1.2.2 Vickers

Princip měření tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vlačování čtyřbokého diamantového jehlanu do materiálu. Matoda je využitelná především pro velmi tuhé polymery a měřena je délka úhlopříčky vtisku jehlanu.

Definovanou podmínkou je v tomto případě konstantní zatížení.[8], [11]

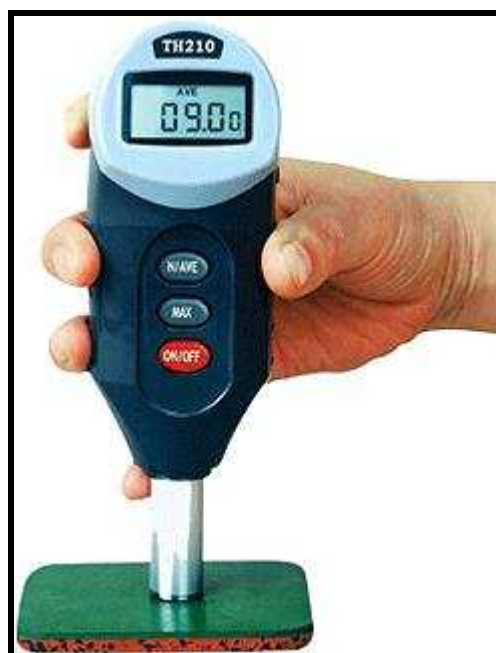


Obr. 12. Zkouška tvrdosti podle Vickerse [11]

5.1.2.3 Tvrđost Shore A a Shore D

Jedna z neznámějších metod pro měření tvrdosti měkkých polymerů a elastomerů. Princip je založen na vtlačování komolého kužele, měřenou veličinou je odpor proti vtlačování hrotu. Zatěžování je způsobeno pomocí pružiny, která je umístěna v přístroji. Rozmezí je 0-100°Sh(stupně Shore). Tloušťka měřeného tělesa musí být minimálně 6 mm, délka měření trvá 3-15 s, je požadován minimální počet měření třikrát.

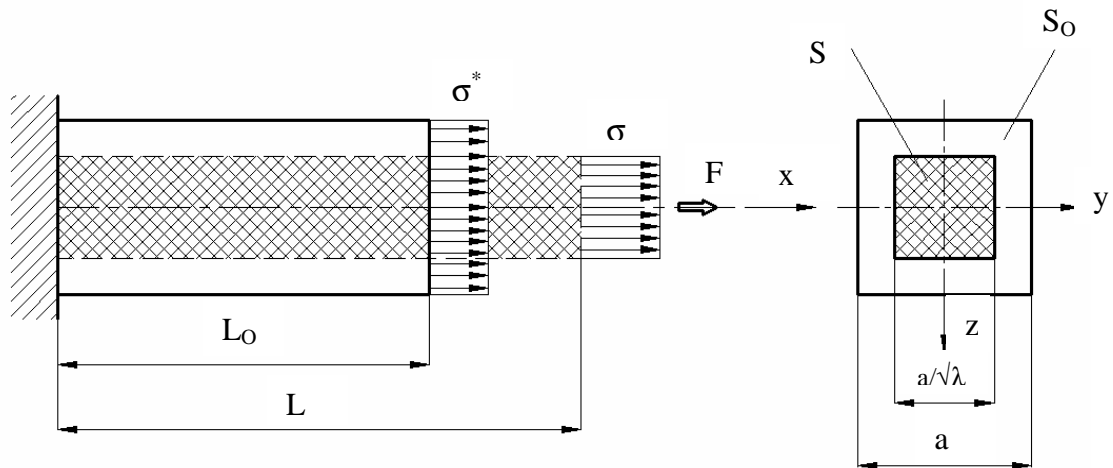
Známa je i metoda Shore D, princip je podobný s rozdílem, že se vtlačuje komolý jehlan se špičkou, kdežto u Shore A se jedná o kužel a to plochý(bez špičky).[8], [11]



Obr. 13. Tvrđost Shore

6 HYPERELASTICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ

6.1 Velké deformace



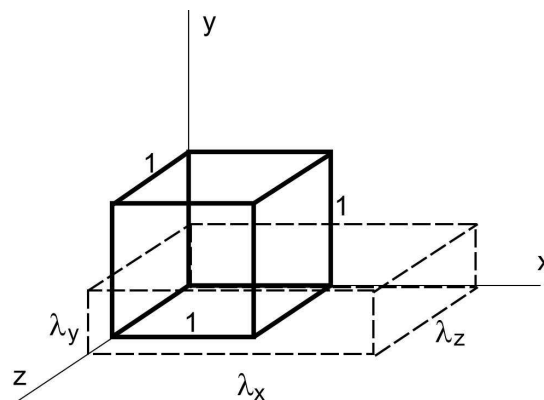
Obr. 14. Jednoosý tah elastomerního prvku [14]

„Sledujme prvek z elastomeru při zkoušce jednoosým tahem, viz obr. 14, tzv. **elongační poměr** je definován vztahem“[14]:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = 1 + \varepsilon \quad (3)$$

„Prodloužení ve směru osy vzorku nechť je $\lambda = \lambda_x$. Elongační poměry v příčných směrech y, z pak v případě nestlačitelného materiálu činí:“[14]

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (4)$$



Obr. 15. Elementární krychle [14]

„neboť podmínka zachování konstatního objemu má dle obr.15 zřejmě tvar:“[14]

$$\lambda_x \cdot \lambda_y \cdot \lambda_z = 1 \quad (5)$$

„a vzhledem k izotropii je $\lambda_y = \lambda_z$.“[14] (6)

„Jak patrně, velké deformace zkušebního prvku výrazně mění velikost příčného průřezu. Je-li plocha původního – nedeformovaného průřezu $S_0 = a^2$, potom při prodloužení λ je plocha průřezu:“[14]

$$S = \frac{a^2}{\lambda} \quad \text{Je tedy } \frac{S}{S_0} = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

„V oblasti konečných deformací je tak nutno rozeznávat **napětí smluvní** (tzv. **inženýrská**), definovaná jako podíl síly na jednotku nedeformovaného průřezu“[14]

$$\sigma^* = \frac{F}{S_0} \quad (8)$$

„a **napětí skutečná**, tj. hodnotu síly vztaženou na jednotku deformovaného průřezu, tedy průřezu skutečné velikosti, v němž daná síla působí :“[14]

$$\sigma = \frac{F}{S} = \lambda \cdot \sigma^* \quad (9)$$

„Pro smluvní napětí platí s uvážením, že $\lambda = 1 + \varepsilon$, a tedy $d\lambda = d\varepsilon$ “[14]

„ $\sigma^* = \frac{dW}{d\lambda}$ pro skutečné napětí je pak $\sigma = \frac{\lambda \cdot dW}{d\lambda}$ “[14] (10)

„Uvažujme nyní stav 3D deformace, daný hlavními elongačními poměry $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, viz obr. 16.

Infinitezimální změně deformačního stavu odpovídá příslušná změna deformační energie

$$dW = \sigma_1 \lambda_2 \lambda_3 d\lambda_1 + \sigma_2 \lambda_3 \lambda_1 d\lambda_2 + \sigma_3 \lambda_1 \lambda_2 d\lambda_3 \quad (11)$$

Vyjádřením této změny jako totálního diferenciálu funkce $W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ je také:“[14]

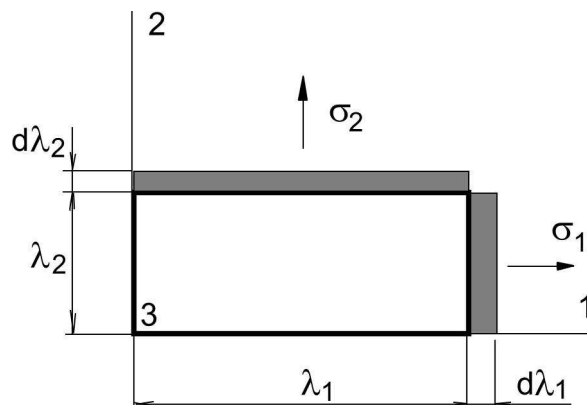
$$dW = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} d\lambda_1 + \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} d\lambda_2 + \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} d\lambda_3 \quad (12)$$

„Srovnáním obou vztahů odtud vyplývá, že“[14]

$$\sigma_i = \frac{1}{\lambda_j \cdot \lambda_k} \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (13)$$

„V případě nestlačitelného materiálu je $\frac{1}{\lambda_j \cdot \lambda_k} = \lambda_i$ “ [14] (14)

„Pro distorzní část napjatosti pak platí $\sigma_i' = \lambda_j \cdot \frac{\partial W'}{\partial \lambda_i}$ “ [14] (15)



Obr. 16. 3D deformace [14]

„Měrná deformační energie objemové části napjatosti W'' je zřejmě rovna nule, neboť $\lambda_j = 0, i = 1, 2, 3$. Celková napětí jsou tak“ [14]

$$\sigma_i = \lambda_j \left(\frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \right) + p \quad (16)$$

„Kde p je složka objemové části napjatosti.“ [14]

6.2 Neohookeovský potenciál deformační energie

Jednoosý tah – tlak

„Uvažujme *Mooney-Rivlinovu rovnici* potenciálu deformační energie pro zcela *nestlačitelný materiál*:“ [14]

$$W = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} \cdot (I_1 - 3)^i \cdot (I_2 - 3)^j \quad (17)$$

$i=0, j=0$

„kde I_1, I_2 , jsou invarianty Greenova tenzoru deformace

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$
 [14] (18)

„Pro $i=1, j=0$, odtud dostáváme tzv. neohookeovský model hyperelastického chování nestlačitelného materiálu:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) = C_{10} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad [14] \quad (19)$$

„Uvažujme jednoosý tah / tlak s prodloužením ve směru tahového / tlakového napětí $\lambda_1 = \lambda$.“ [14]

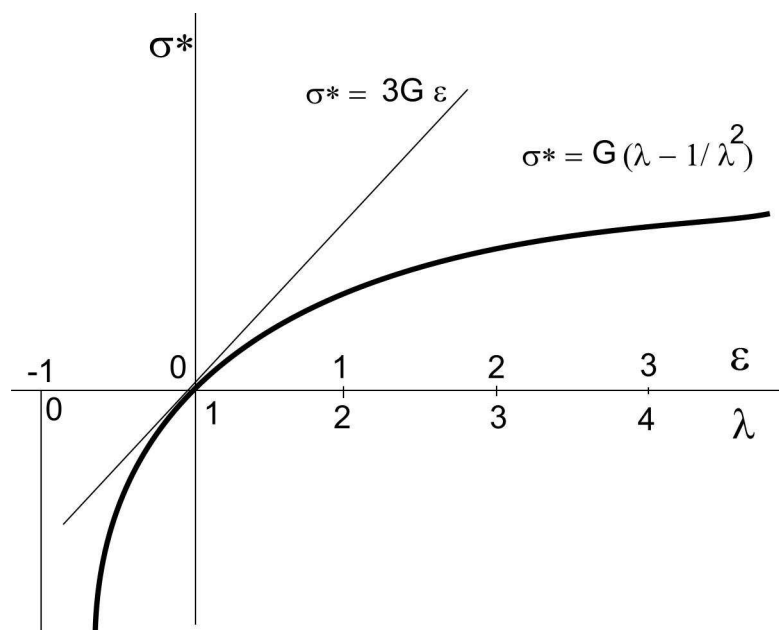
„V příčných směrech je zřejmé $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda}$.“ (20)

Po dosazení do rovnice je

$$W = C_{10} (\lambda^2 + 2/\lambda - 3) . \quad (21)$$

Smluvní – inženýrské napětí je podle“ [14]

$$\sigma^* = dW/d\lambda = 2C_{10} (\lambda - 1/\lambda^2) \quad (22)$$



Obr. 17. Smluvní inženýrské napětí [14]

„Závislost je graficky znázorněna na obr.17 . Směrnice tečny k této závislosti je

$$d\sigma/d\lambda = 2C_{10} (1 + 2/\lambda^3) \quad [14] , \quad (23)$$

„takže hodnota směrnice v počátku tj. v $\lambda = 1$ ($\epsilon = 0$) činí

$$d\sigma/d\lambda = 2C_{10} (1 + 2) = 6C_{10} \quad [14] \quad (24)$$

„Hodnota směrnice v počátku – tj. pro nulovou hodnotu napětí a deformace je rovna modulu pružnosti. Je tedy $6C_{10} = E$. Poněvadž pro nestlačitelný materiál je $\nu = 0,5$ a $G = E/2(1 + \nu) = E/3$ “ [14]

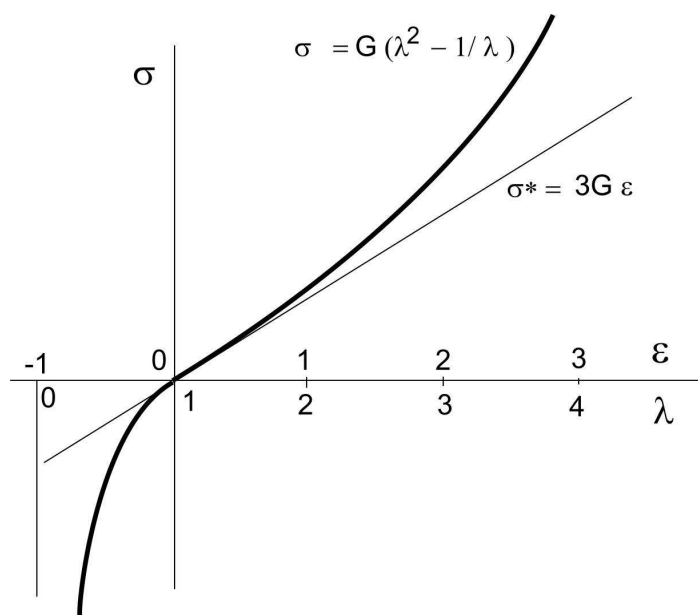
(25)

„je $C_{10} = G/2$ a potenciál deformační energie

$$W = C_{10} (I_1 - 3) = (G/2) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad [14] \quad (26)$$

„Smluvní napětí v jednoosém tahu/tlaku je pak

$$\sigma^* = dW/d\lambda = G (\lambda - 1/\lambda^2) \quad [14] \quad (27)$$



Obr. 18. Skutečné napětí [14]

„Závislost skutečného napětí v tahu/tlaku při jednoosém namáhání je

$$\sigma = \lambda \sigma^* = G (\lambda^2 - 1/\lambda) \quad [14] \quad (28)$$

„Závislost (1.63) je graficky vynesena v obr. 1.21. Směrnice této závislosti pro nulovou hodnotu deformace je nyní

$$d\sigma (\lambda = 0) / d\lambda = G (2\lambda + 1/\lambda^2) = 3G \quad [14] \quad (29)$$

Ekvibiaxiální napjatost

„V případě obecné biaxiální napjatosti jsou hlavní elongační poměry zřejmě

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = 1 / \lambda_1 \lambda_2 \quad [14] \quad (30)$$

„Hustota deformační energie je pak

$$W = (G/2) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 1 / \lambda_1^2 \lambda_2^2 - 3) \quad (31)$$

a smluvní napětí jsou $\sigma_1^* = dW / d\lambda_1 = G (\lambda_1 - 1 / \lambda_1^3 \lambda_2^2),$ (32)

$$\sigma_2^* = dW / d\lambda_2 = G (\lambda_2 - 1 / \lambda_2^3 \lambda_1^2). \quad [14] \quad (33)$$

„V případě ekvibiaxiální napjatosti je $\sigma_1^* = \sigma_2^* = \sigma^*$, takže

$$\sigma^* = G (\lambda - 1 / \lambda^5). \quad [14] \quad (34)$$

„Skutečné napětí pak

$$\sigma = \lambda \sigma^* = G (\lambda^2 - 1 / \lambda^4). \quad [14] \quad (35)$$

„Směrnice závislosti v počátku je $d\sigma(\lambda = 0) / d\lambda = G (2\lambda + 4 / \lambda^5) = 6G = 2E$,

v souladu s rovnicemi elasticity, kde pro ekvibiaxiální napjatost platí $\sigma = E \varepsilon / (1 - \nu) = E^* \varepsilon$.“ [14]

„Pro $\nu = 0,5$ je odtud hodnota sférického modulu pružnosti $E^* = 2E$ „ [14] (36)

Čistý smyk

„Ve směru hlavních os čistého smyku je zřejmě $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 1 / \lambda$, takže $\lambda_3 = 1$.

Pro relativně malé deformace platí s použitím Mohrovy kružnice deformace čistého smyku

$$\lambda_1 = \lambda = 1 + \varepsilon_1 = 1 + \gamma/2, \quad \lambda_2 = 1 / \lambda = 1 + \varepsilon_2 = 1 - \gamma/2. \quad (37)$$

$$\text{Z rozdílu obou rovnic je odtud } \gamma = \lambda - 1 / \lambda \quad [14] \quad (38)$$

„Hustota deformační energie je tak v případě čistého smyku

$$W = (G/2) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) = (G/2) (\lambda^2 + 1 / \lambda^2 - 2), \quad (39)$$

$$W = (G/2) (\lambda - 1 / \lambda)^2 = (G/2) \gamma^2. \quad [14] \quad (40)$$

„Smykové napětí je tak $\tau = dW / d\gamma = G \gamma$.“ [14] (41)

„Výsledek potvrzuje známou skutečnost, že závislosti napětí versus deformace vykazují u prvků namáhaných smykem prakticky lineární průběh i v oblasti větších deformací (cca. do 50%).“ [14]

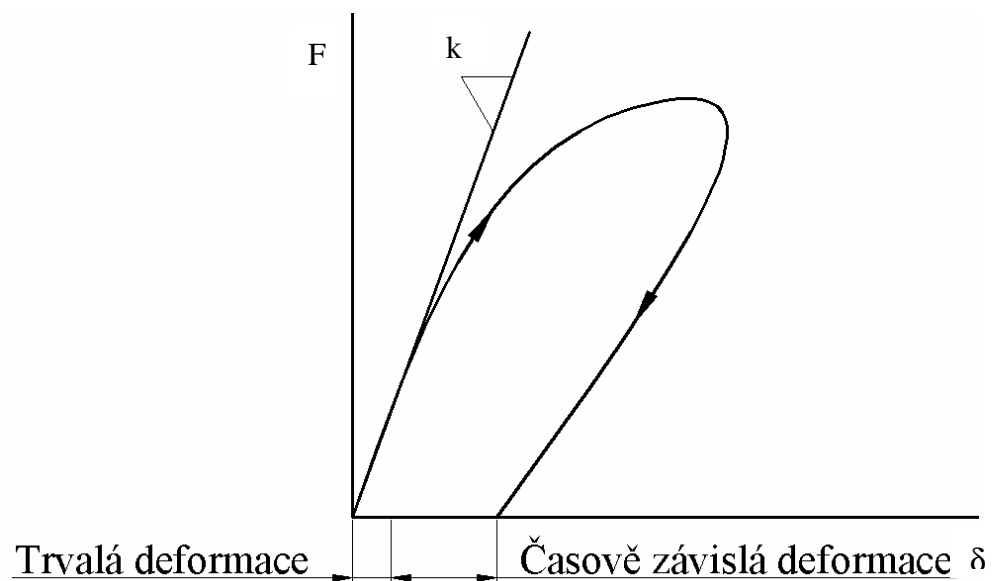
7 PRYŽKOVOVÉ PRUŽNÉ PRVKY

Pryžkovové pružné prvky mají nezastupitelné místo v technické praxi. Jedná se především o oblasti dopravních prostředků, kde se uplatňují jako tlumící prvky tzv. silent-bloky, a také v různých odvětvích různých oblastí výrobního průmyslu, jako aplikace anti-vibračních prvků například pro uložení strojních zařízení v halách podniků.

7.1 Charakteristika pružiny

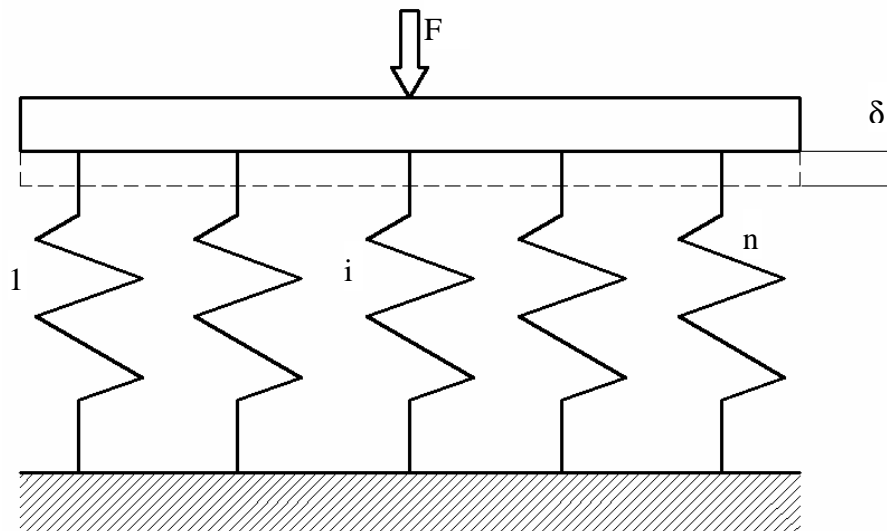
Závislostí zatížení na deformaci je popsána charakteristika pružiny. V případě větších deformací jsou charakteristiky pryžových pružin obecně nelineární, což je způsobeno nejen vlivy materiálovými, ale i geometrickými.

Směrnice charakteristiky pružiny v počátku je nazývána k nebo-li konstanta pružiny, dále vyjadřuje tuhost pružiny. [14]



Obr. 19. Závislost zatížení na deformaci pružiny [14]

7.1.1 Uspořádání pružin vedle sebe



Obr. 20. Pružiny vedle sebe [14]

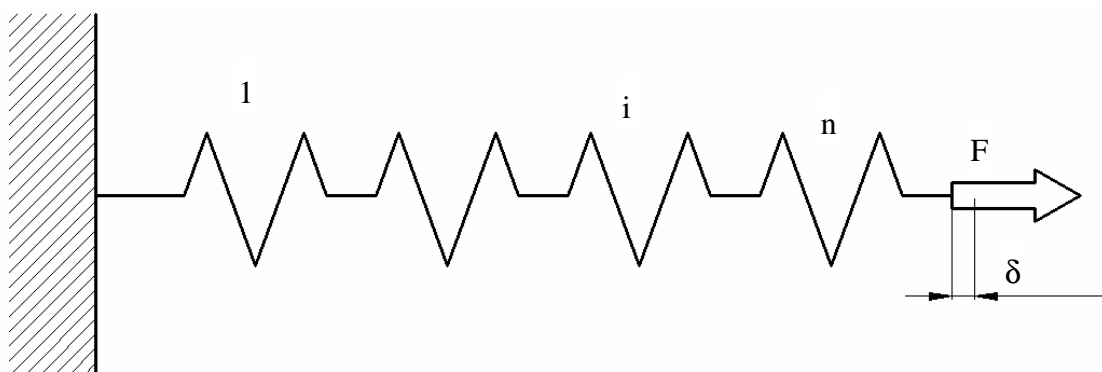
$$\delta = \delta_i$$

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \delta \sum_{i=1}^n k_i \quad (42)$$

$$k = \sum_{i=1}^n k_i$$

Výsledná tuhost je dána superpozicí tuhostí jednotlivých pružin. [14]

7.1.2 Uspořádání pružin za sebou



Obr. 21. Uspořádání pružin za sebou [14]

$$F = F_i$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (43)$$

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}$$

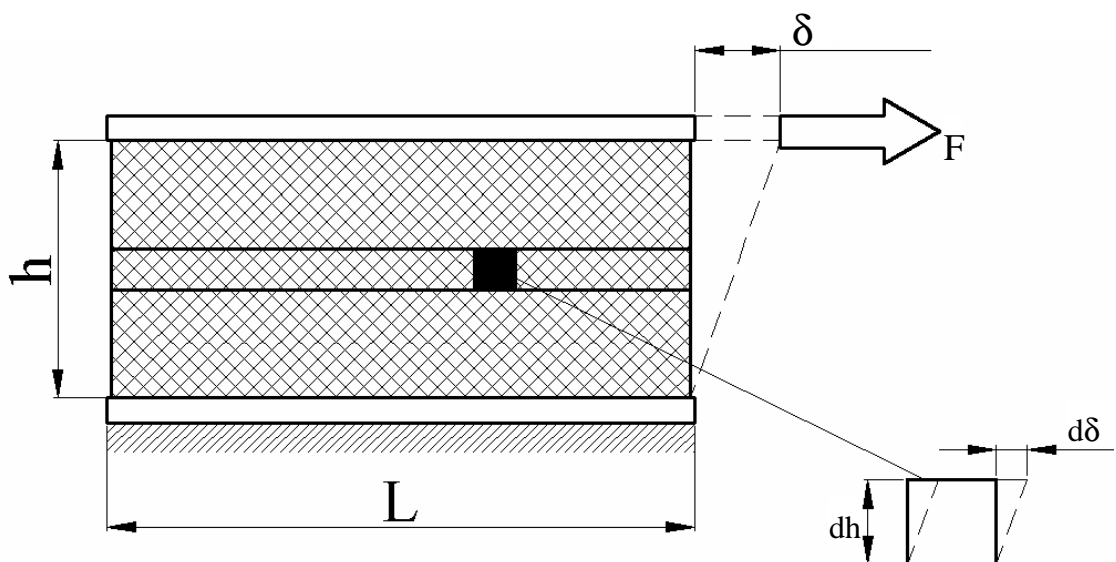
Výsledná tuhost za sebou řazených pružin je v každém případě menší než nejmenší použitá tuhost pružiny. [14]

7.2 Pryžkovové pružiny

7.2.1 Lineárně smyková pružina- prvek namáhaný smykem

V tomto případě se jedná o případ tzv. lineárního smyku, a tak konstanta jednoduché pružiny je [14]:

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (44)$$



Obr. 22. Lineárně smyková pružina

Střední smykové napětí v oblasti malých deformací, a tedy pomocí Hookeova zákona je:

$$\tau_{stř} = G \cdot \gamma$$

kde

$$\gamma = \operatorname{tg} \varphi = \frac{d\delta}{dh} = \frac{\delta}{h}$$

Je tedy

$$F = \tau_{stř} \cdot b \cdot l$$

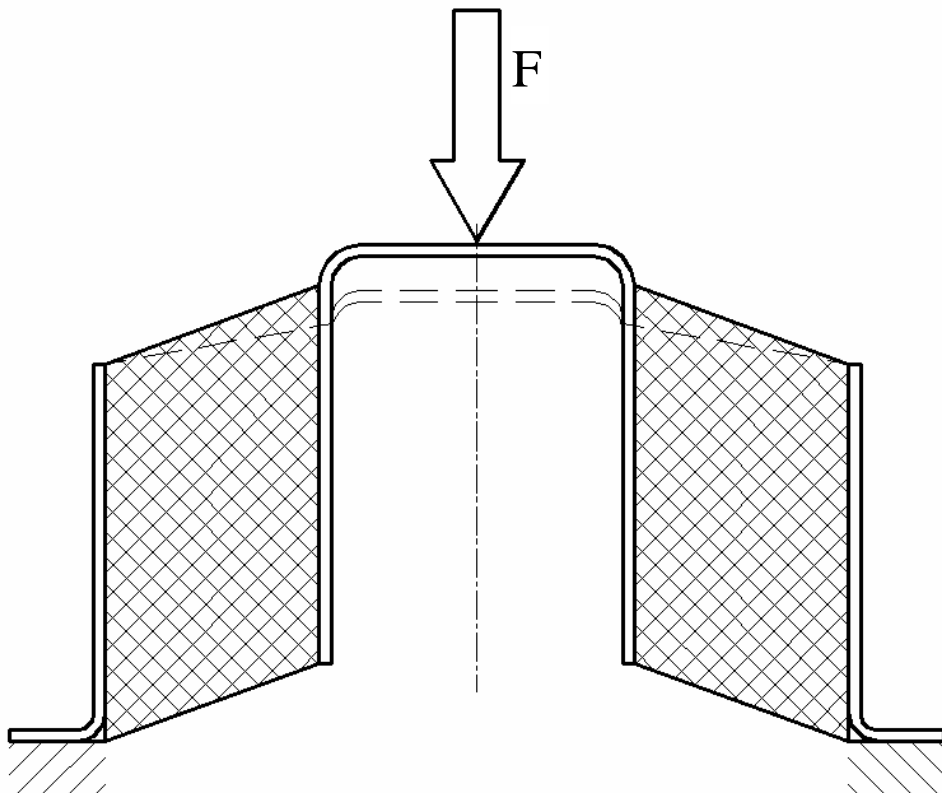
takže

$$k = \frac{G \cdot b \cdot l}{h}$$

(45)

Oblast čistého smyku je v důsledku okrajové podmínky volného povrchu na obou koncích porušena. Jednotlivé složky 2D napjatosti vykazují v rozích napěťové špičky, jejichž následek se projevuje snížením trvanlivosti pružného prvku vlivem tvorby separací v těchto místech.

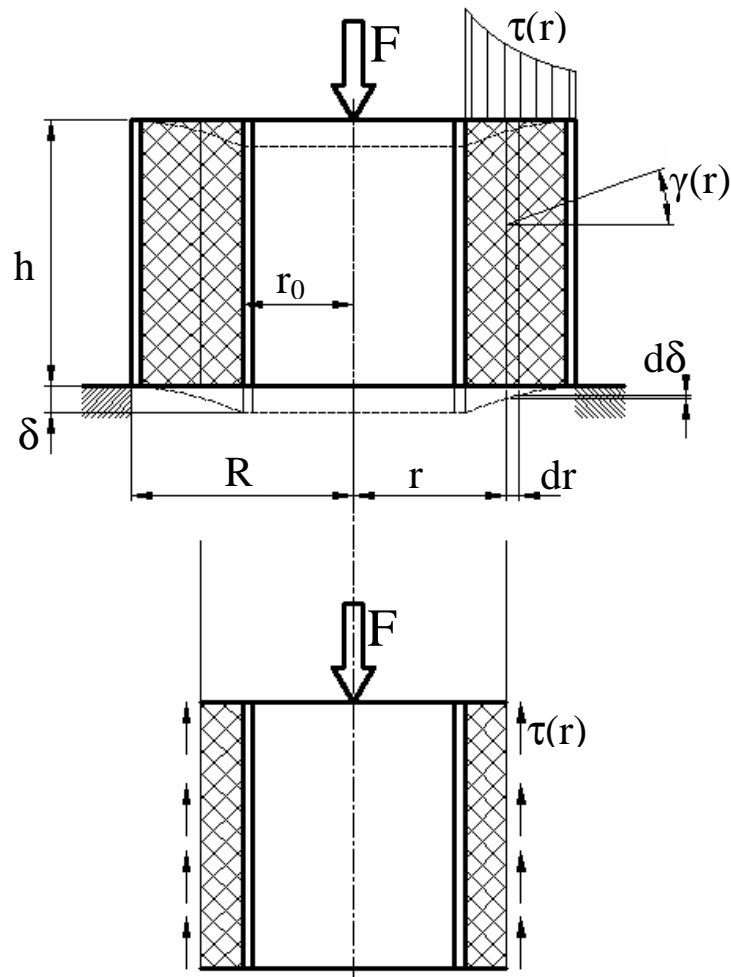
Ke snížení účinku tahového napětí lze montovat dvojice pružin s tlakovým předpětím, podobný smysl má následující konstrukční úprava. [14]



Obr. 23. Konstrukční úprava lineárně smykové pružiny [14]

7.2.2 Rotačně- symetrická lineárně smyková pružina namáhaná axiální silou

Tato pružina je válovou obdobou pružiny předcházející, a tedy lineárně smykové pružiny. [14]



Obr. 24. Rotačně- symetrická lineárně smyková pružina namáhaná axiální silou [14]

Na obrázku 18 se nachází myšleně oddělená část pomocí válcového řezu, ze kterého určíme střední smykové napětí pomocí rovnice rovnováhy, která je [14]:

$$F = \tau(r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (46)$$

Svislé posunutí na dr činí:

$$d\delta = \gamma dr = \frac{\tau(r) dr}{G} = \frac{F dr}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot G} \quad (47)$$

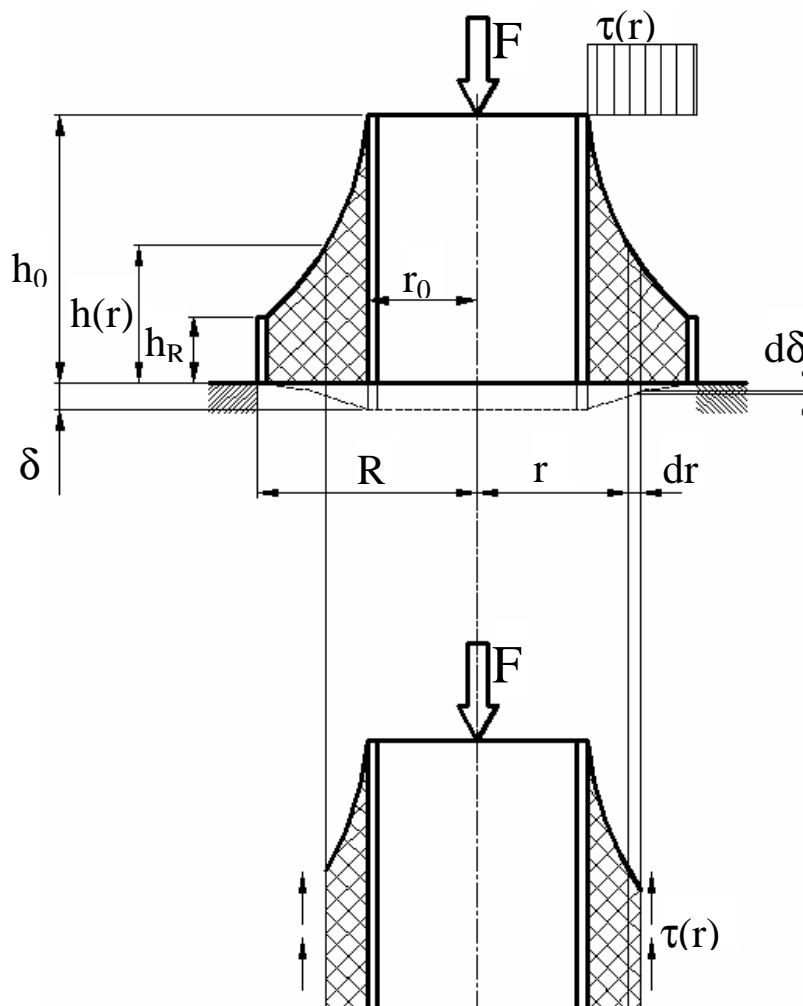
Celkové posunutí pak je:

$$\delta = \int_{r_0}^R d\delta = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot G} \cdot \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} = \frac{F \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot G} \quad (48)$$

Následně konstanta pružiny je:

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot G}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (49)$$

Velkou nevýhodou je nerovnoměrné rozdělení smykových napětí pružného prvku v radiálním směru. Nyní bude opět aplikována konstrukční úprava. [14]



Obr. 25. Konstrukční úprava rotačně symetrické lineární smykové pružiny [14]

Z grafického znázornění vyplývá, že smykové napětí je nyní konstantní, a tedy:

$$\tau = \text{konstantní} = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h(r)} \quad (50)$$

takže

$$d\delta = \frac{\tau dr}{G} = \frac{F dr}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h(r) \cdot G}$$

Označme $h(r) \cdot r = h_0 \cdot r_0$, a tak

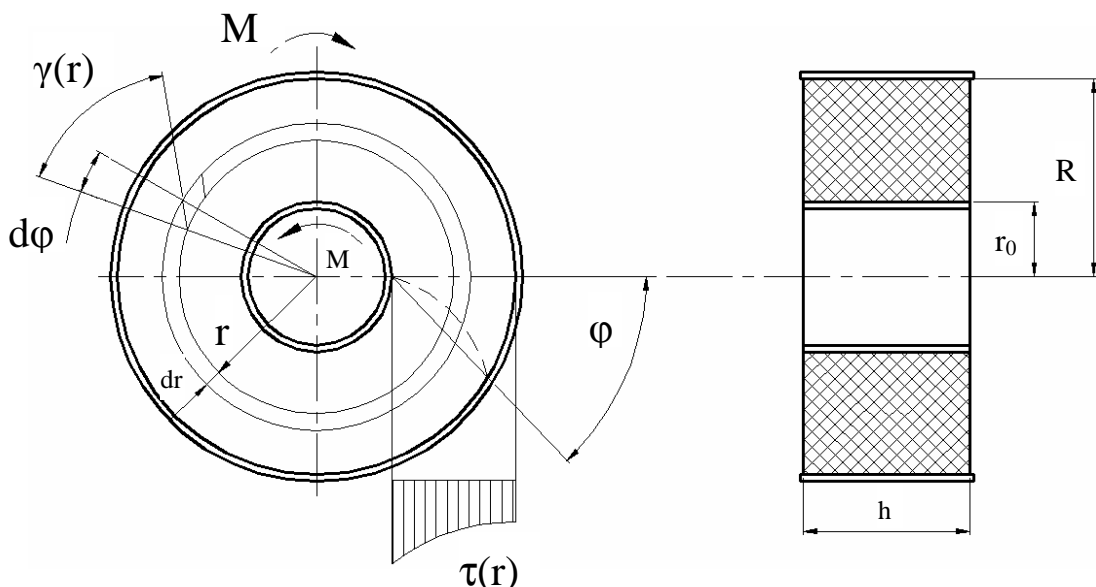
$$d\delta = \frac{\tau dr}{G} = \frac{F dr}{2 \cdot \pi \cdot h_0 \cdot G} \quad (51)$$

$$\delta = \frac{F \cdot (R - r_0)}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h_0 \cdot G}$$

Konstanta pružiny pak je:

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h_0 \cdot G}{(R - r_0)} \quad (52)$$

7.2.3 Rotačně-smykový válcový prvek



Obr. 26. Rotačně-smykový válcový prvek [14]

Rotačně-smykový válcový prvek, který je vyobrazen výše na obrázku 20 je zatížen momentem M , jehož vektor leží v ose tohoto prvku. [14]

Z podmínky momentové rovnováhy vnitřních a vnějších sil na poloměru r vyplývá [14] :

$$\tau(r) = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (53)$$

A tedy smyková deformace na r je:

$$\gamma = \frac{rd\varphi}{dr} = \frac{\tau(r)}{G} \quad (54)$$

takže

$$d\varphi = \frac{Mdr}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot r^3 \cdot G}$$

Po integraci:

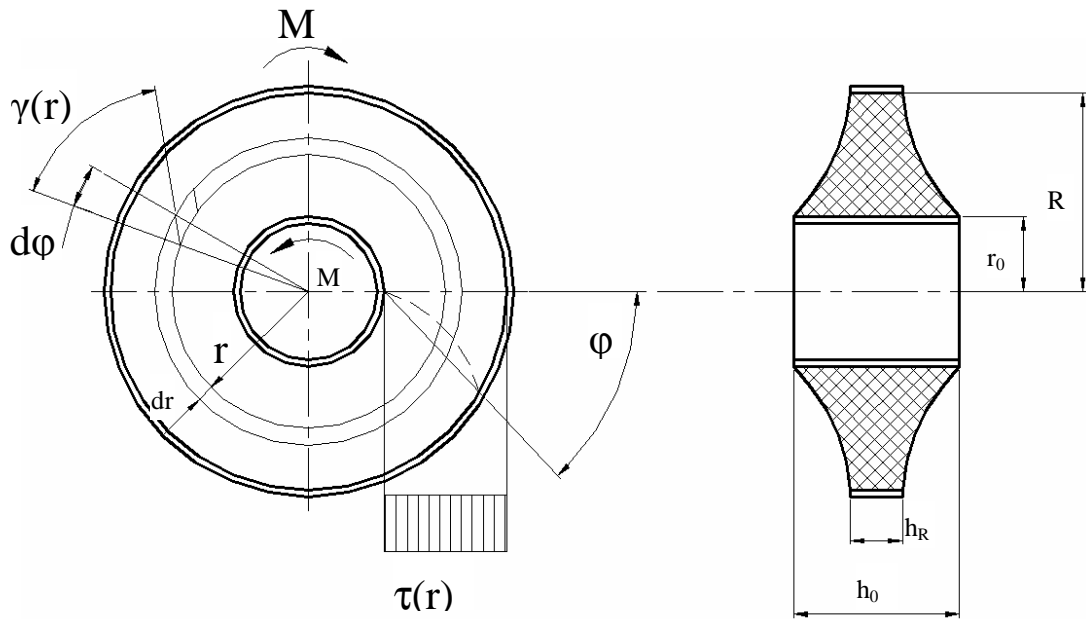
$$\varphi = \frac{M \cdot \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2} \right)}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot G} \quad (55)$$

Tuhost (konstanta pružiny k) je následně:

$$k = \frac{M}{\varphi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot G}{\left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2} \right)} \quad (56)$$

V důsledku vztahu bývají charakteristiky těchto pryžových prvků lineární do úhlové deformace přibližně činící 40°. Rotační smyk je na rozdíl od smyku lineárního bez napěťových špiček, představující napjatost a deformaci v tzv. čistém smyku.

Nyní bude stanovena konstrukční tvarová úprava pro docílení konstantního smykového napětí. [14]



Obr. 27. Konstrukční tvarová úprava rotačně- symetrického válcového prvku

[14]

Cílem úpravy je:

$$\tau(r) = \text{kons tan tní} = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot h_0} \quad (57)$$

tj.

$$r^2 \cdot h(r) = \text{kons tan tní} = r_0^2 \cdot h_0 \quad (58)$$

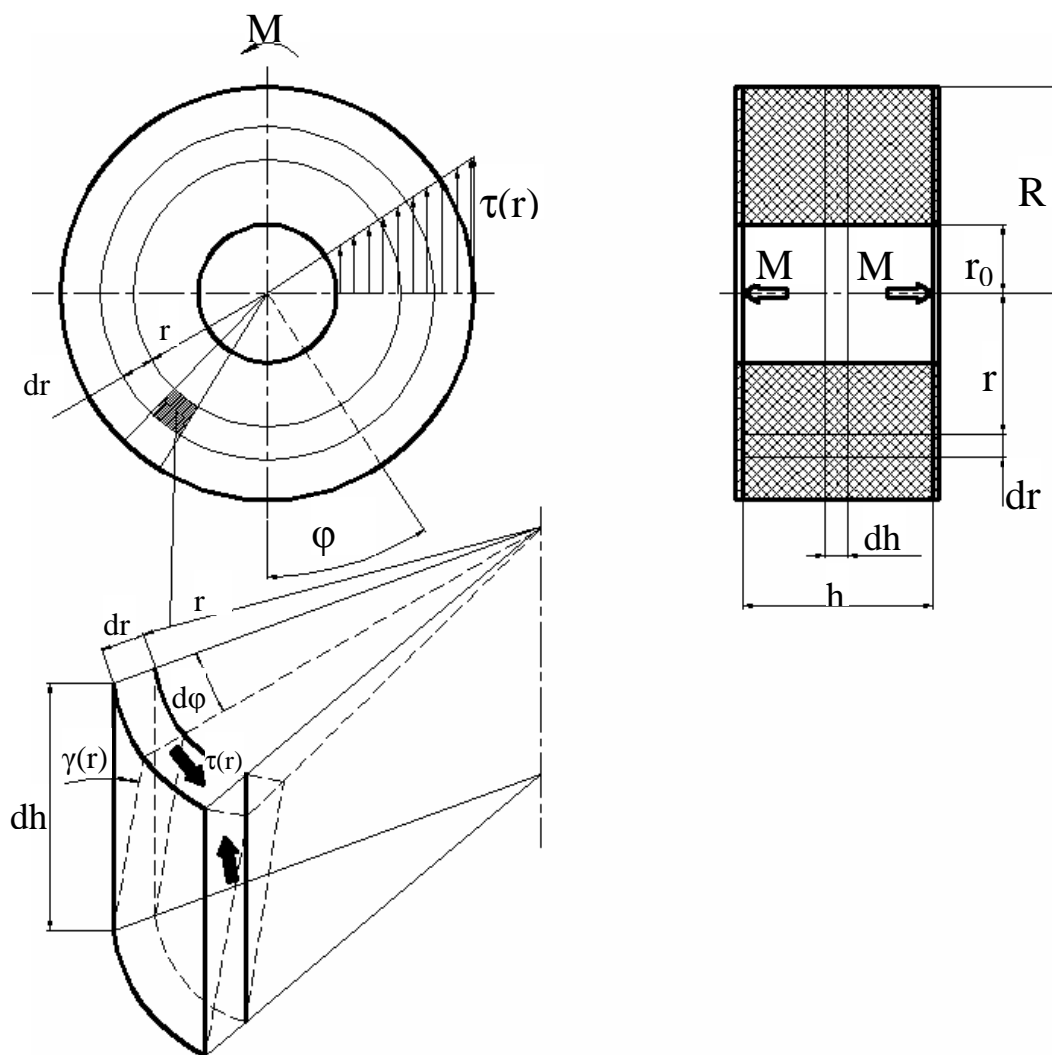
Úhlová deformace je nyní:

$$\varphi = \int_{r_0}^R d\varphi = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot h_0 \cdot G} \cdot \int_{r_0}^R \frac{1}{r} dr = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot h_0 \cdot G} \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad (59)$$

Tuhost pružiny je pak:

$$k = \frac{M}{\varphi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot h_0 \cdot G}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (60)$$

7.2.4 Torzní pružina



Obr. 28. Torzní pružina [14]

Torzní pružina je válcová pružina, která je namáhána na krut. Úhlovou deformaci, nebo-li zkrut válcové pryžové části o velikosti ϕ , způsobí torzní moment M . [14]

Na poloměru r platí:

$$\gamma(r)dh = rd\phi \tag{61}$$

$$\tau(r) = G \cdot \gamma(r) = \frac{G \cdot r \cdot d\phi}{dh}$$

Platí:

$$\frac{d\phi}{dh} = \frac{\phi}{h} \tag{62}$$

Výše popsaná rovnice 62 představuje relativní úhel otočení dvou průřezů vzdálených o jednotku délky. [14]

Na elementární ploše průřezu, která je vymezena dvěma soumeznými válcovými řezy mají smyková napětí výslednici [14]:

$$dM = \tau(r)dS \cdot r = \tau(r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 dr \quad (63)$$

takže po integraci:

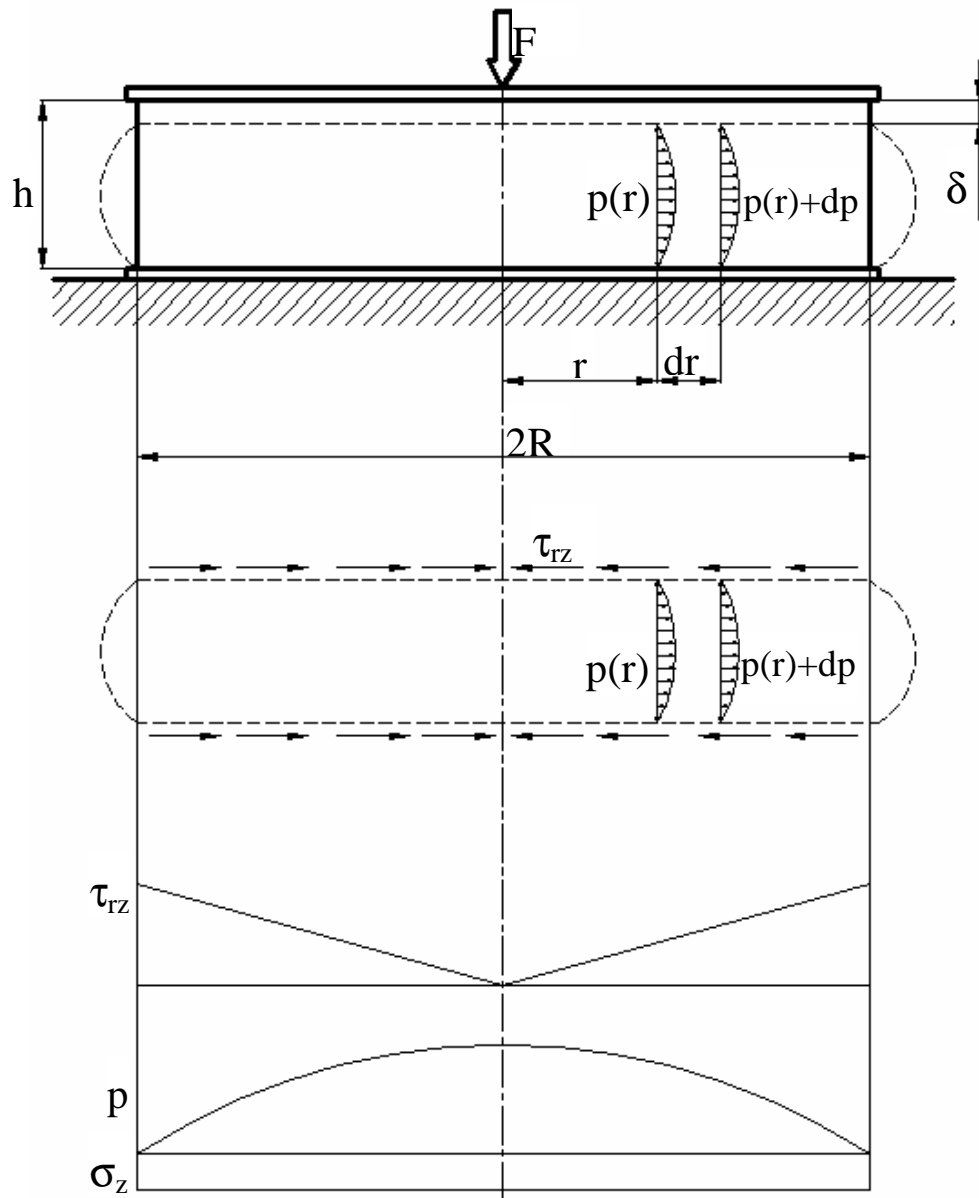
$$M = \frac{\pi \cdot \varphi \cdot G \cdot (R^4 - r_0^4)}{2h} \quad (64)$$

a konstanta pružiny je následně:

$$k = \frac{M}{\varphi} = \frac{\pi \cdot G \cdot (R^4 - r_0^4)}{2h} \quad (65)$$

7.2.5 Tlaková pružina

Tlaková pružina je válcový pryžokovový prvek, který má hlavní parametry, a to poloměr R a výšku h . Tato pružina je zatížena osově symetrickou silou F . Pryž je přivulkanizována k ocelovým plechům, a tak je zabráněno prostému jednoosému stlačení. Pokud nedochází k separaci, tak lze tuto vazbu plechů a pryže uvažovat jako totálně tuhou, protože pryž a ocel vykazují značné rozdíly co se tuhosti týče. [14]



Obr. 29. Tlaková pružina [14]

Při porovnání se stlačováním volného válce jednoosým napětím se vliv tuhé vazby s ocelovými plechy projeví vyšší tuhostí, a to jako důsledek bránění volným radiálním deformacím v oblasti vazby. [14]

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\delta}{h} \quad (66)$$

Zavádíme smykové napětí τ_{rz} , které představuje náhradu účinku ocelových částí. Tato napětí budou přímo úměrná normálové složce a závislá na relativní radiální pořadnici r/h . [14]

Pokud považujeme poměr r/h jako lineární, tak [14]

$$\tau_{rz} \approx E \cdot \frac{\delta}{h} \cdot \frac{r}{h} \quad (67)$$

Z rovnice rovnováhy elementu pryžového bloku je [14]:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \tau_{rz} dr &= h dp(r) \\ \text{tj.} & \\ \tau_{rz} &\approx \frac{h}{2} \cdot \frac{dp(r)}{dr} \end{aligned} \quad (68)$$

Veličina $p(r)$ je hodnota tlaku, který charakterizuje tok pryže při zatěžování, tato hodnota je hodnota normálového napětí. [14]

A tedy:

$$dp = \frac{2 \cdot E \cdot \delta \cdot r}{h^3} dr \quad (69)$$

Hodnota tlaku v místě r :

$$p(r) = \frac{2 \cdot E \cdot \delta}{h^3} \int_0^r r dr = \frac{E \cdot \delta \cdot r^2}{h^3} + C \quad (70)$$

V $r=R$ je $p(R) = 0$, a tedy:

$$C = -\frac{E \cdot \delta \cdot R^2}{h^3} \quad (71)$$

Odhadovaná závislost tlaku p na radiální pořadnici r je tedy [14]:

$$p(r) \approx \frac{E \cdot \delta \cdot (R^2 - r^2)}{h^3} \quad (72)$$

Celková síla F , která je potřebná ke stlačení pryžkovového válcového prvku je dána integrací normálových napětí po zatížené ploše prvku [14]:

$$F_p = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot p(r) dr \quad (73)$$

Po dosazení a úpravě:

$$F_p = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot R^4}{2 \cdot h^3} \quad (74)$$

$$F_o = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma_z dr \quad (74)$$

Po dosazení a úpravě:

$$F_o = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot R^2}{h} \quad (75)$$

Celková síla je:

$$F = F_o + F_p = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot R^2}{h} \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{R}{2 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (76)$$

$$F = F_o \cdot \phi(f)$$

Výraz $\Phi(f)$ je funkcí tzv. tvarového faktoru, což je podíl zatížené plochy a povrchu volné pryže tlakové pružiny. V tomto případě válcové pružiny je [14] :

$$f = \frac{\pi \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot h} = \frac{R}{2 \cdot h} \quad (77)$$

Tvarová funkce je tedy:

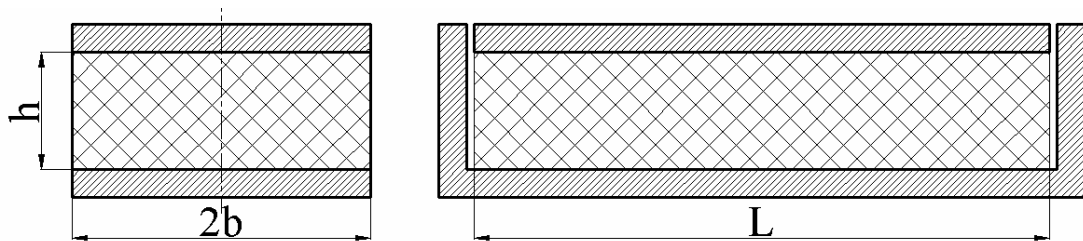
$$\phi(f) = 1 + 2 \cdot f^2 \quad (78)$$

Tvarová funkce je vyjádřením poměrného zvýšení tuhosti pryžového prvku vlivem vazby na ocelové části. [14]

Pokud je konstanta nevázaného pryžového prvku $k_o = \frac{F_o}{\delta}$, tak konstanta pryžokovového prvku $k = \frac{F}{\delta}$, pak poměrné zvýšení tuhosti vlivem vazby na ocelové části je [14]:

$$\boxed{\frac{k}{k_o} = \frac{F}{F_o} = \phi(f)} \quad (79)$$

Naproti tomu tvarový faktor f charakterizuje tvar v rámci geometrie- typu pryžokovové tlakové pružiny, tvarová funkce $\Phi(f)$ se týká určité konkrétní geometrie, a tedy typu pružiny. [14]

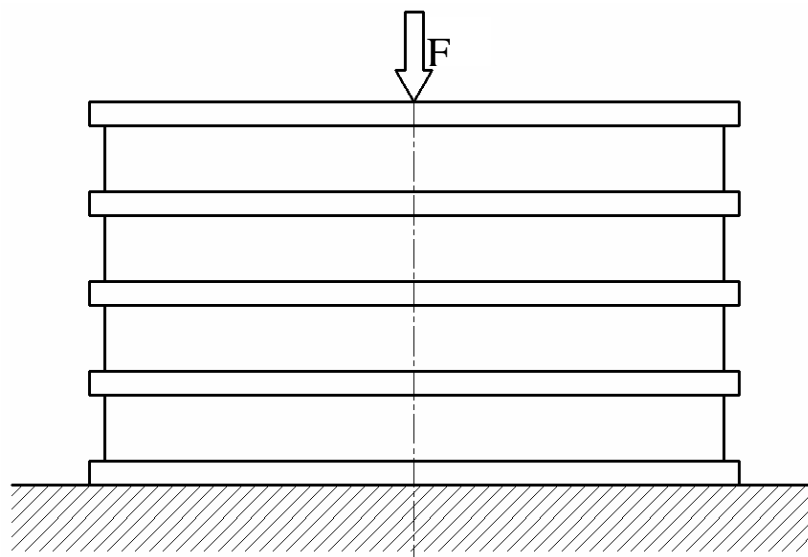


Obr. 30. Pružina typu dlouhého pásu [14]

Na obrázku 24 je možné vidět pružinu typu pásu o šířce $2b$, délce L a výšce h .

$$f = \frac{2 \cdot b \cdot L}{2 \cdot h \cdot L} = \frac{b}{h} \quad (80)$$

$$\phi(f) = 1 + f^2$$



Obr. 31. Vícevrstvá pružina [14]

Velmi častým případem z technické praxe je spojení několika pružin pomocí mezi-plechů, kdy je vyrobena sestava, tzv. vícevrstvá pružina. [14]

Konstanta (tuhost) vícevrstvé pružiny pak je:

$$\frac{1}{k_v} = \frac{n}{k}$$

tj.

$$k_v = \frac{k}{n}$$

k_v – výsledná tuhost

n – počet vrstev

8 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato práce se zabývá elastomerními pružinami, a tak v první části práce byly popsány suroviny pro výrobu elastomerní (gumárenské) směsi.

V druhé části práce byly popsány jednotlivé pochody při přípravě kaučukové směsi.

Následně, po přípravě kaučukové směsi, je nutné ji uchovat (uskladnit) pro další zpracování, a tedy tomuto je věnována třetí kapitola teoretické části s názvem Skladování kaučukových směsí.

Před samotnou výrobou pryžového výrobku z kaučukové směsi je nutné provést zkoušky zpracovatelnosti kaučukové směsi, čemuž je věnována kapitola čtvrtá.

Pátá kapitola řeší problematiku hodnocení mechanických vlastností již hotových výrobků, především se jedná o zkoušky krátkodobé statické.

Šestá kapitola této teoretické části diplomové práce je věnována elastomerní pružinám, především popisu jejich mechanického chování a v návaznosti s tím, se zabývá tvarem, případně dimenzováním.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část diplomové práce se bude zabývat tvarovou funkcí a tvarovým faktorem pryžokovových tlakových pružin.

Zprvu se praktická část práce bude věnovat výrobě zkušebních těles, která budou následně podrobena mechanickým zkouškám v tlaku.

Dále bude nutné analyticky řešit tvarové funkce a tvarové faktory těles, která byla podrobena experimentu.

Úkolem další části diplomové práce je zhotovit modelové studie elastomerních pryžokovových pružných prvků.

V poslední části budou výsledky experimentálního, analytického a modelového řešení pružných prvků porovnány.

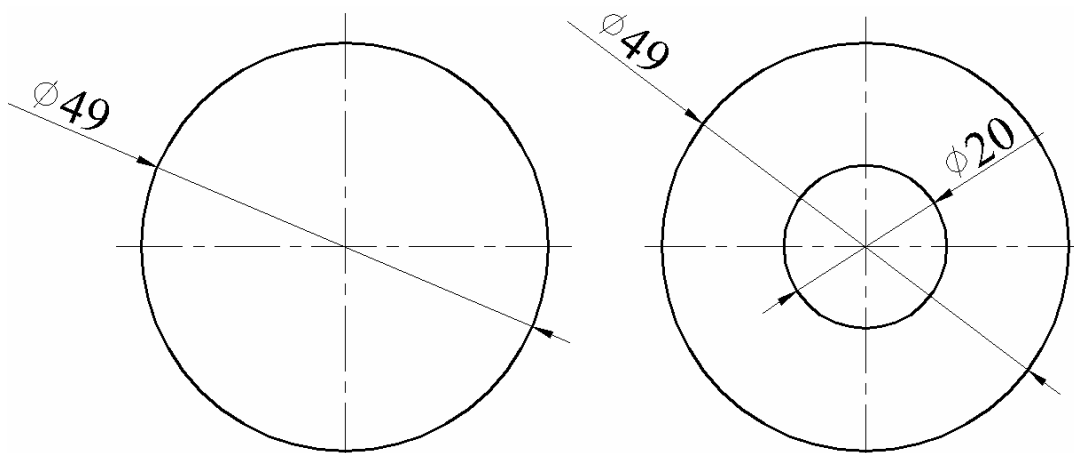
10 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM ELASTOMERNÍCH PRUŽIN

První kapitola praktické části diplomové práce je věnována experimentálnímu zkoumání pružin z elastomerní směsi.

10.1 Příprava experimentu

Pro výrobu jakéhokoliv výrobku je nosným elementem materiál. V tomto případě pro výrobu elastomerních pružin, které budou podrobeny tlakové zkoušce, se jedná o běhounovou směs používanou při výrobě autoplášťů. Tato elastomerní směs je označena S 1234.

Tato směs byla následně vložena do formy v dílnách UTB, a při technologických podmínkách času lisování $t = 20$ min a teplotě $T = 170^{\circ}\text{C}$, byly v elektricky vytápěném etážovém lisu vyrobeny válce o dvou různých průřezech. Konkrétně se jedná o průřez plného válce a válce s otvorem (dírou). Tyto válce bylo nutné dále nařezat na stanovené délky 10 mm, 20 mm, a 30 mm.



Obr. 32. Rozměry průřezů elastomerních zkušebních těles

10.2 Tlaková zkouška

Pomocí zkušebního stroje Zwick 1456, který je umístěn v laboratoři UVI, byly provedeny tlakové zkoušky jednotlivých zkušebních těles.

Zkoušky byly prováděny za laboratorní teploty, to znamená, že zkušební tělesa nebyla nijak temperována (zahřívána či ochlazována).

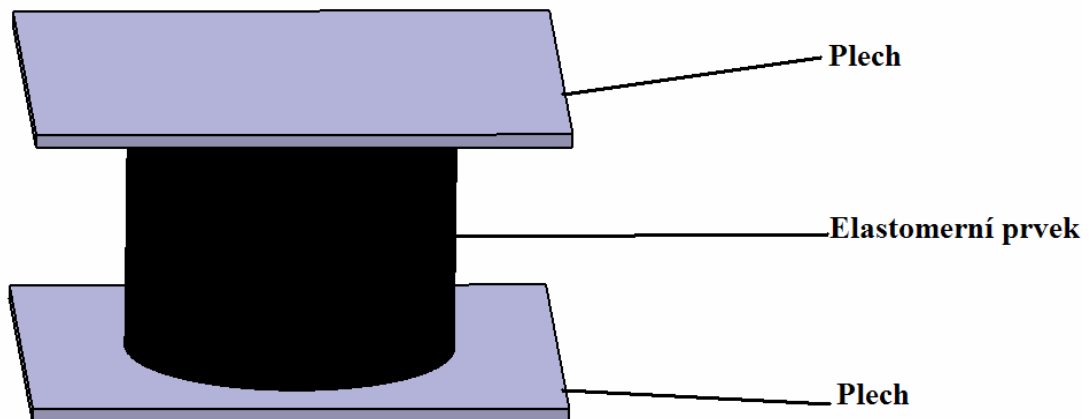
Zkušební stroj Zwick 1456 je omezen maximální silou, která činí 20 kN. Jednotlivé zkoušky byly realizovány za cílem co největší deformace zkušebního tělesa, každá zkouška byla zastavena manuálně.

Tlakové zkoušky byly diferencovány do dvou způsobů, a to na zkoušky pružin nevázaných a pružin vázaných.

Nevázané tlakové pružiny

Jedná se v našem případě o zkušební elastomerní tělesa, která neobsahují navulkanizované plechové elementy, a tedy jedná se o volnou elastomerní pružinu, konkrétně typu válce, bez dalších elementů, která bude podrobena tlakové zkoušce.

Vázané tlakové pružiny



Obr. 33. Vázaná tlaková pružina

V případě vázané elastomerní tlakové pružiny je z obrázku 28 patrná odlišnost od pružiny nevázané (volné).

Tato pružina je tedy brána jako sestava dvou plechů a pryžového tlumícího prvku, lze tedy říci, že se jedná o pryžokovový pružný prvek tzv. silentblok.

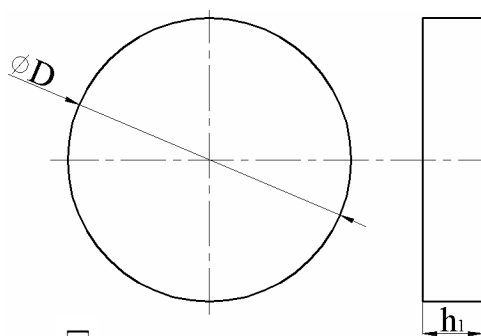
Těchto prvků se hojně využívá v technické praxi například od antivibračních tlumících prvků u výrobních strojů k eliminaci rázů, chvění, vibrací a hluku až po komponenty v automobilovém a leteckém průmyslu.

Zásadní je tuhá vazba na rozhraní elastomer- ocel, a tedy je nutné řešit kvalitní spojení těchto dvou materiálů, čehož lze docílit především navulkanizováním.

Pro případ tlakových zkoušek byly tyto dva rozdílné materiály spojeny pomocí sekundového lepidla, aby byla zajištěna tuhá vazba.

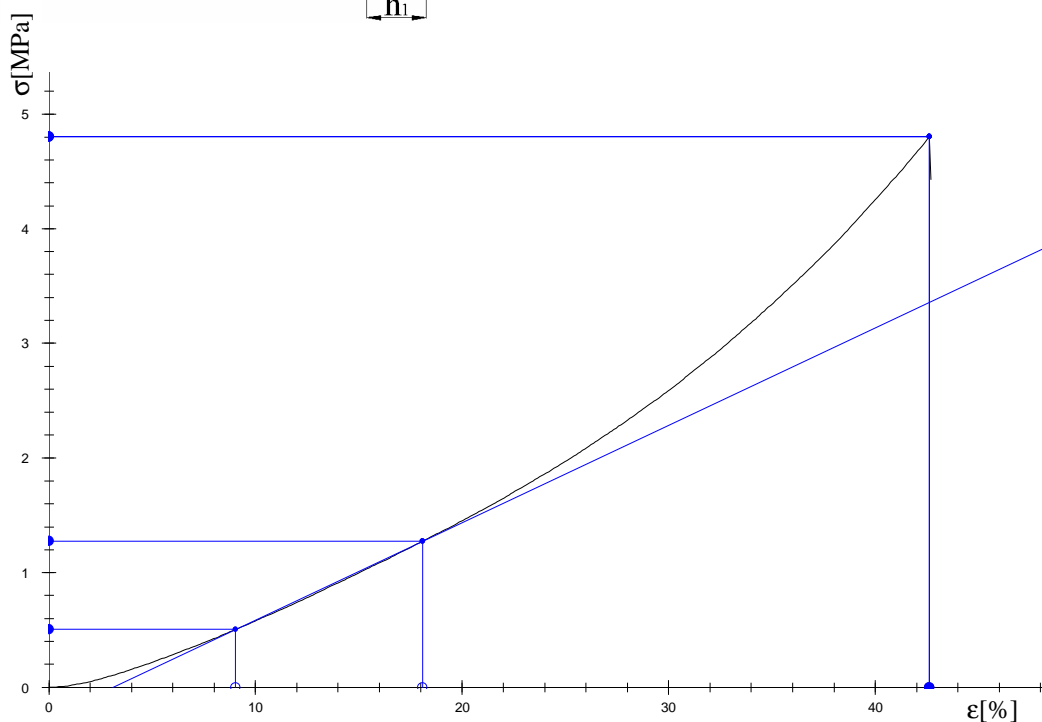
10.2.1 Výsledky tlakových zkoušek nevázaných plných válcových elastomerních pružin

Zkušební těleso 1



Zkušební těleso 1	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_1	12,5

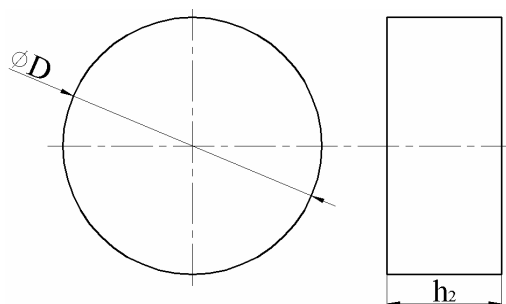
Tab. 2. Rozměry tělesa 1



Obr. 34. Závislost napětí na deformaci tělesa 1

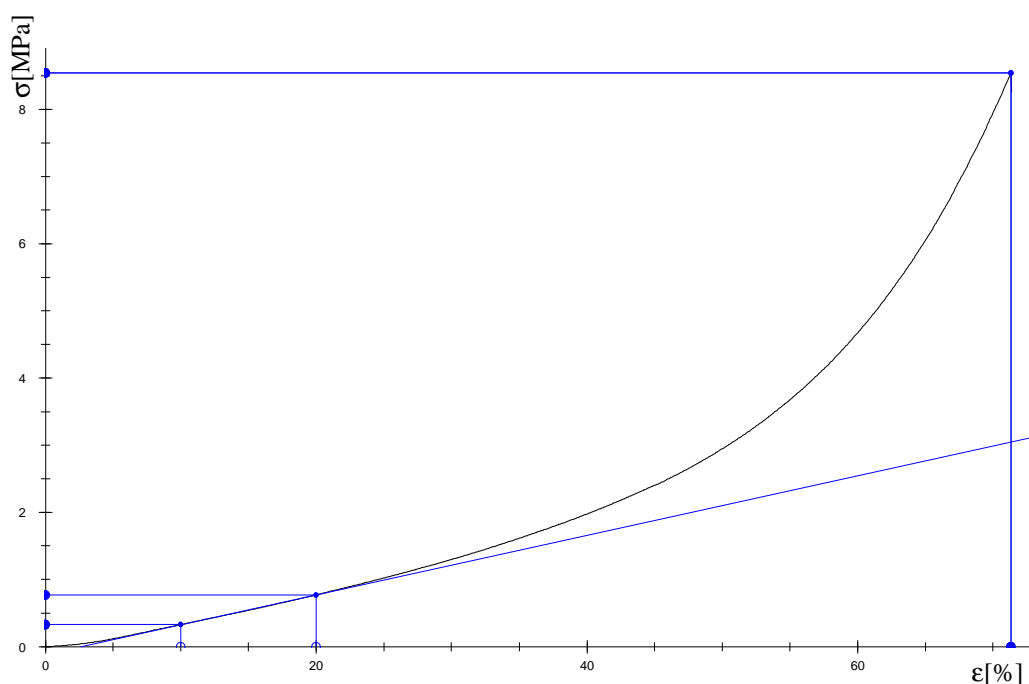
Zkušební těleso 1				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	9355,21	42,62	4,71	8,5
2	9400,05	43,44	4,80	8,3
3	9360,52	42,84	4,73	8,45
4	9200,27	41,25	4,56	8,85
5	9321,48	42,35	4,68	8,65
Průměr	9327,51	42,50	4,70	8,55
Odchylka	76,40	0,81	0,09	0,21

Tab. 3. Experimentální hodnoty tělesa 1

Zkušební těleso 2


Zkušební těleso 2	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_2	20

Tab. 4. Rozměry tělesa 2

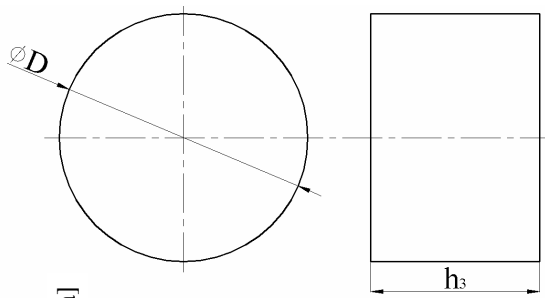


Obr. 35. Závislost napětí na deformaci tělesa 2

Zkušební těleso 2				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	16645,55	71,34	14,5	4,44
2	15550,96	71,21	14,85	4,24
3	15762,45	71,32	14,65	4,32
4	15892,47	70,58	14,38	4,26
5	16121,62	70,62	14,22	4,38
Průměr	15994,61	71,01	14,52	4,33
Odchylka	418,63	0,38	0,24	0,08

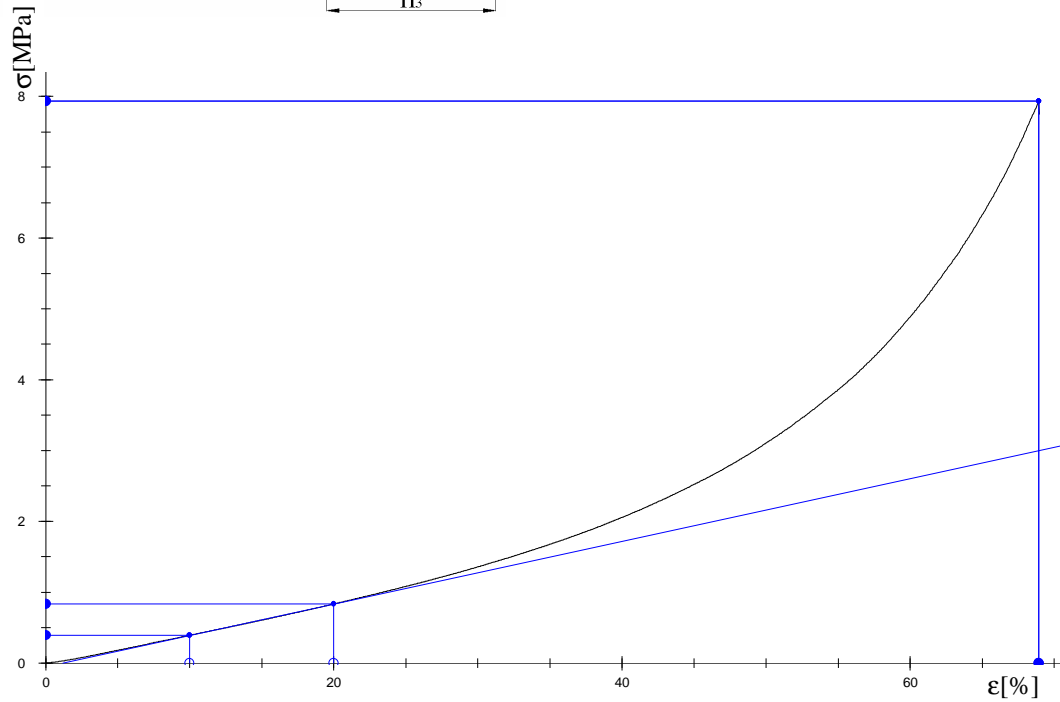
Tab. 5. Experimentální hodnoty tělesa 2

Zkušební těleso 3



Zkušební těleso 3	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_3	30

Tab. 6. Rozměry tělesa 3

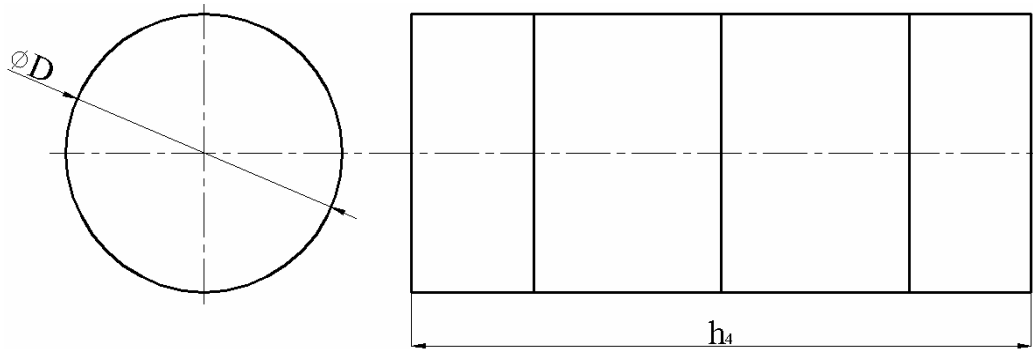


Obr. 36. Závislost napětí na deformaci tělesa 3

Zkušební těleso 3				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	15454,03	68,91	20	4,43
2	15460,27	69,06	20,30	4,25
3	15435,68	68,72	20,12	4,35
4	15359,62	68,29	20,18	4,38
5	15628,96	69,25	20,24	4,29
Průměr	15467,71	68,85	20,17	4,34
Odchylka	98,68	0,37	0,12	0,07

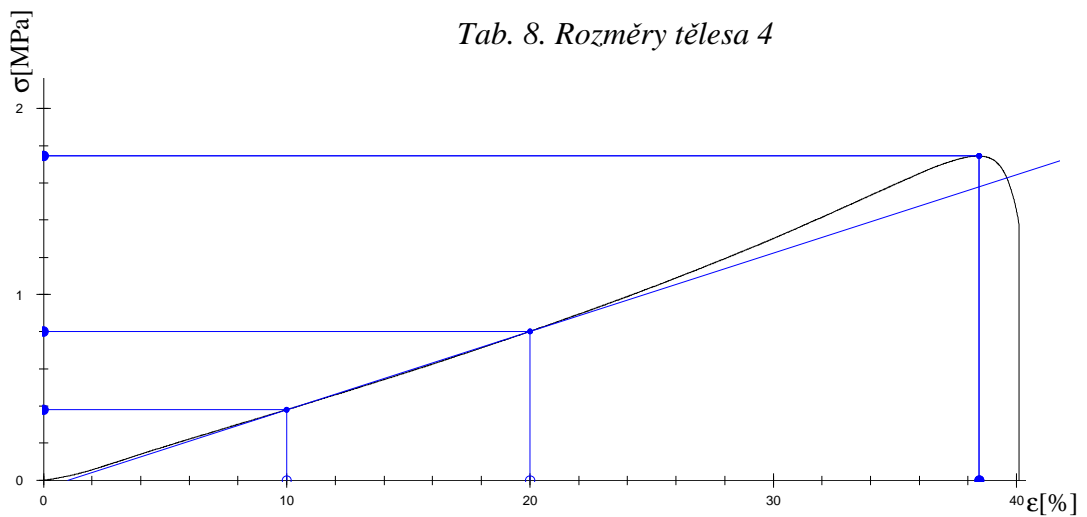
Tab. 7. Experimentální hodnoty tělesa 3

Zkušební těleso 4



Zkušební těleso 4	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_4	100

Tab. 8. Rozměry tělesa 4

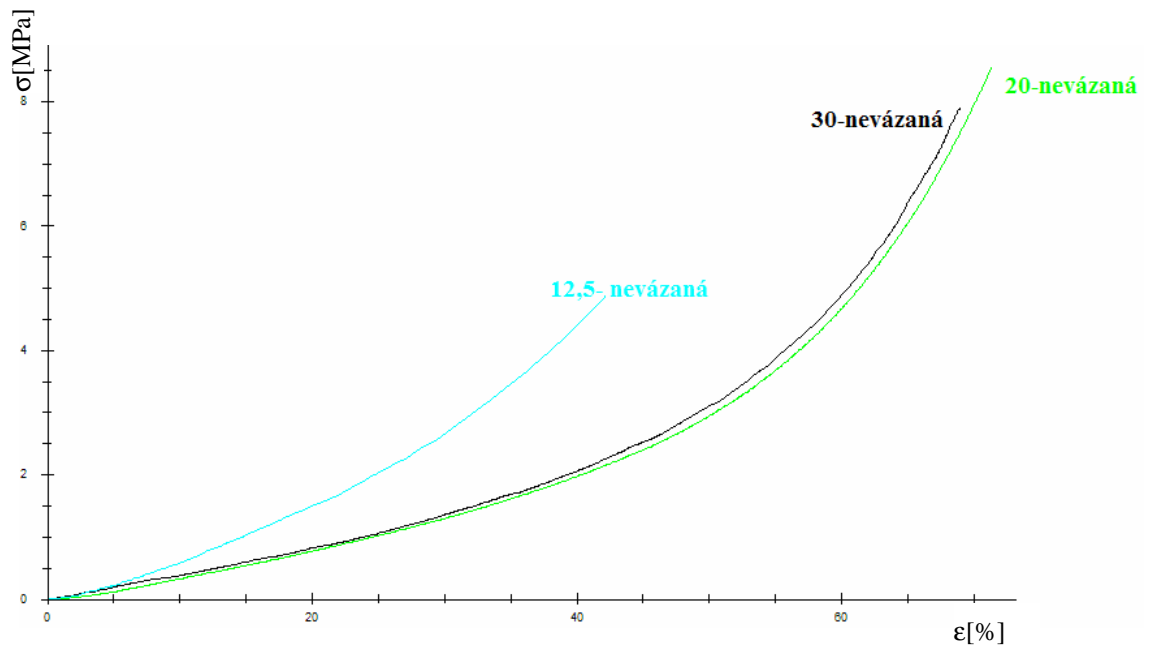


Obr. 37. Závislost napětí na deformaci tělesa 4

Zkušební těleso 4			
F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
3397,92	38,45	39,02	4,22

Tab. 9. Experimentální hodnoty tělesa 4

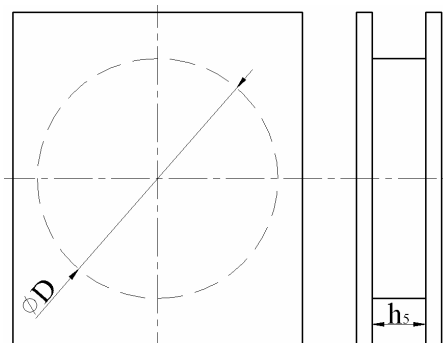
V tomto případě byla tlakové zkoušce podrobena nevázaná pružina, složená ze čtyř dílčích těles, vnější okraje byly nalubrikovány z důvodu eliminace tření, a z experimentu získaná hodnota E bude následně použita jako jedna z materiálových charakteristik při tvorbě modelových studií daných typů pružin.



Obr. 38. Grafické srovnání nevázaných pružin plného průřezu

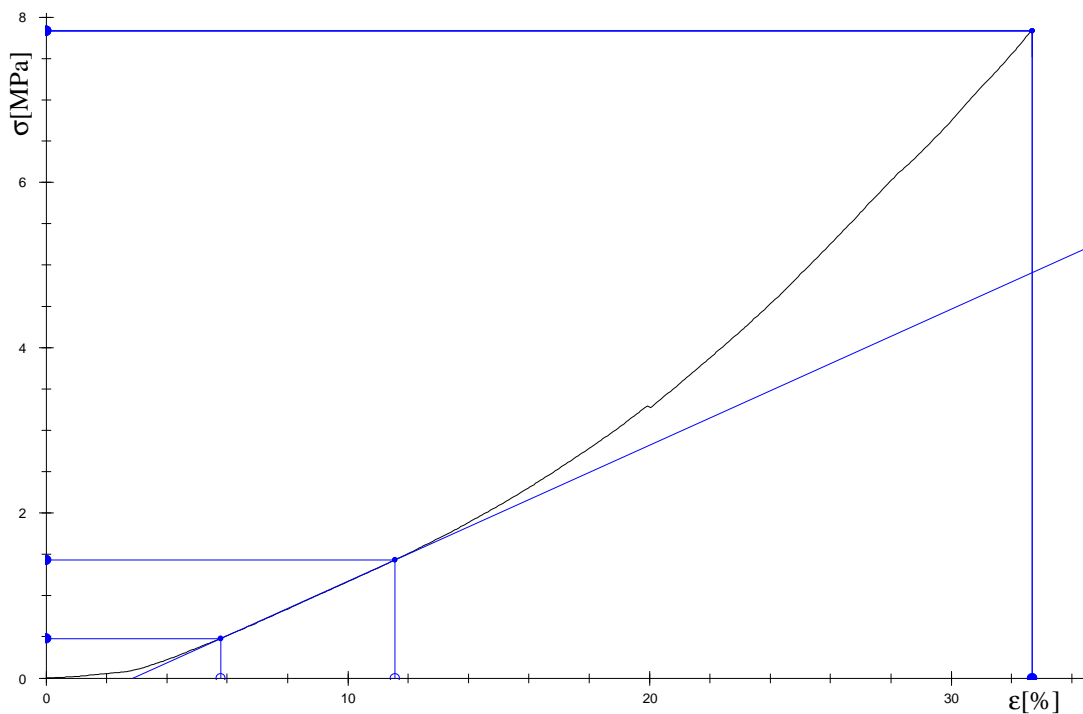
10.2.2 Výsledky tlakových zkoušek vázaných plných válcových elastomerních pružin

Zkušební těleso 5



Zkušební těleso 5	
Rozměr	Hodnota[mm]
φD	49
Výška h _s	12,5

Tab. 10. Rozměry tělesa 5

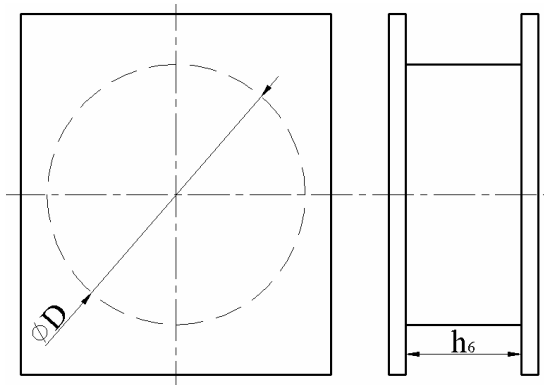


Obr. 39. Závislost napětí na deformaci tělesa 5

Zkušební těleso 5				
Měření	F[N]	ε[%]	δ[mm]	E[MPa]
1	15259,1	32,68	5,65	16,47
2	15125,61	31,42	5,32	16,22
3	15225,45	32,12	5,48	16,38
4	15301,58	33,15	5,76	16,41
5	15200,27	31,56	5,39	16,31
Průměr	15222,40	32,19	5,52	16,36
Odchylka	66,11	0,73	0,18	0,10

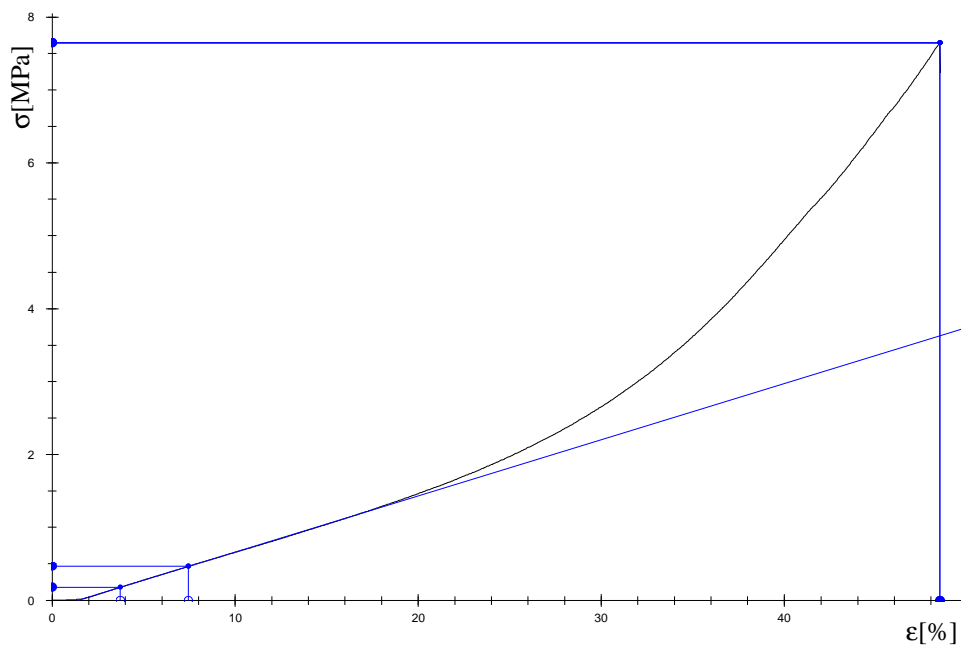
Tab. 11. Experimentální hodnoty tělesa 5

Zkušební těleso 6



Zkušební těleso 6	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_6	20

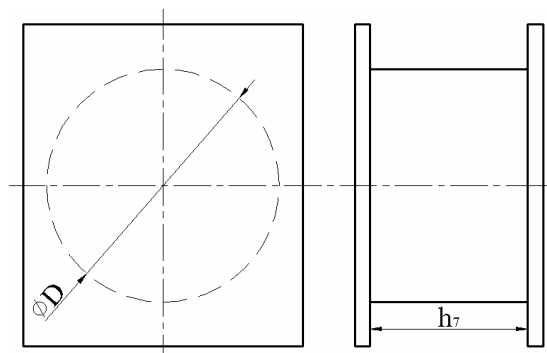
Tab. 12. Rozměry tělesa 6



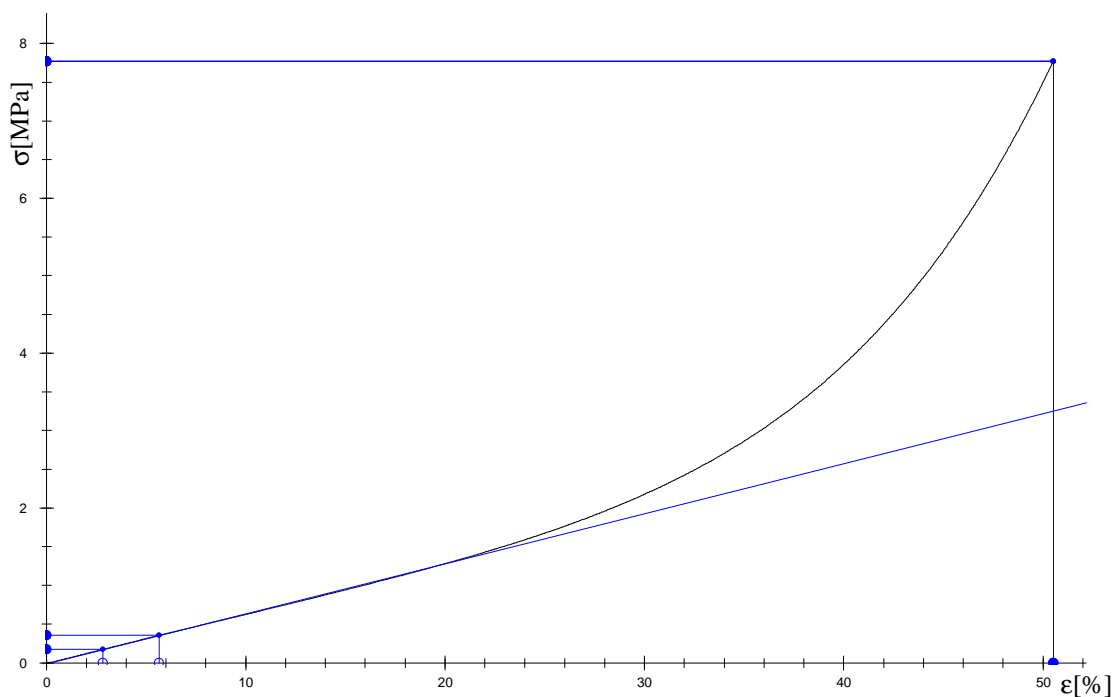
Obr. 40. Závislost napětí na deformaci tělesa 6

Zkušební těleso 6				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	14893,69	48,49	13,03	7,71
2	15227,98	43,28	11,96	8,75
3	14856,32	49,32	11,78	8,42
4	14923,47	48,27	11,92	8,71
5	14885,69	48,42	11,88	8,48
Průměr	14957,43	47,56	12,11	8,41
Odchylka	153,12	2,43	0,52	0,42

Tab. 13. Experimentální hodnoty tělesa 6

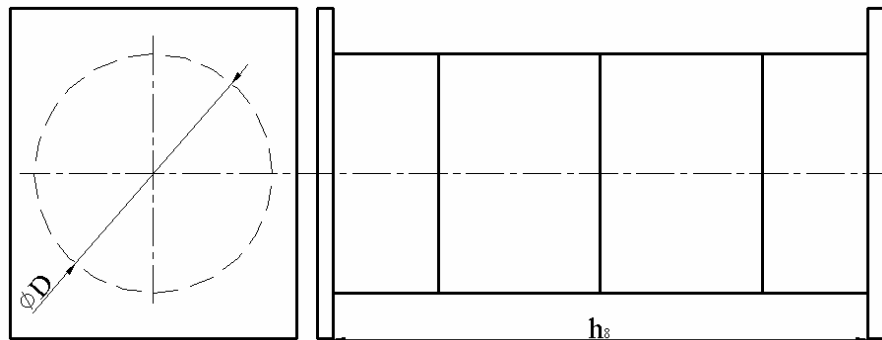
Zkušební těleso 7


Zkušební těleso 7	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_7	30

Tab. 14. Rozměry tělesa 7

Obr. 41. Závislost napětí na deformaci tělesa 7

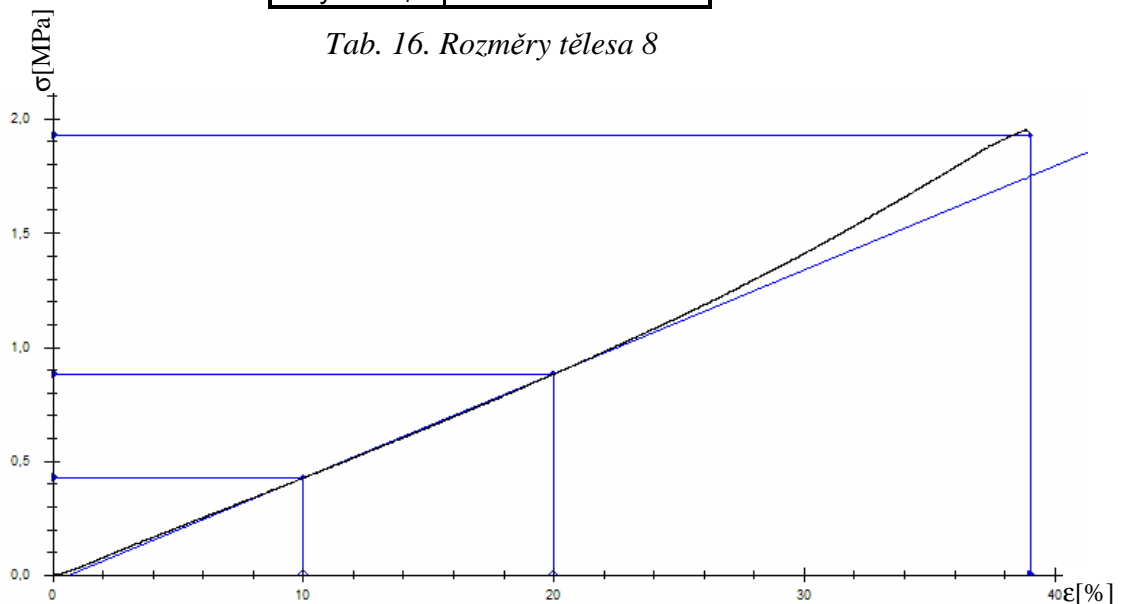
Zkušební těleso 7				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	15130,63	50,51	17,88	6,46
2	15245,46	50,3	18,33	7,07
3	15126,86	50,25	17,65	6,58
4	15232,56	50,15	17,89	7,02
5	15115,32	50,08	17,95	6,86
Průměr	15170,17	50,26	17,94	6,80
Odchylka	63,26	0,16	0,25	0,27

Tab. 15. Experimentální hodnoty tělesa 7

Zkušební těleso 8


Zkušební těleso 8	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_7	100

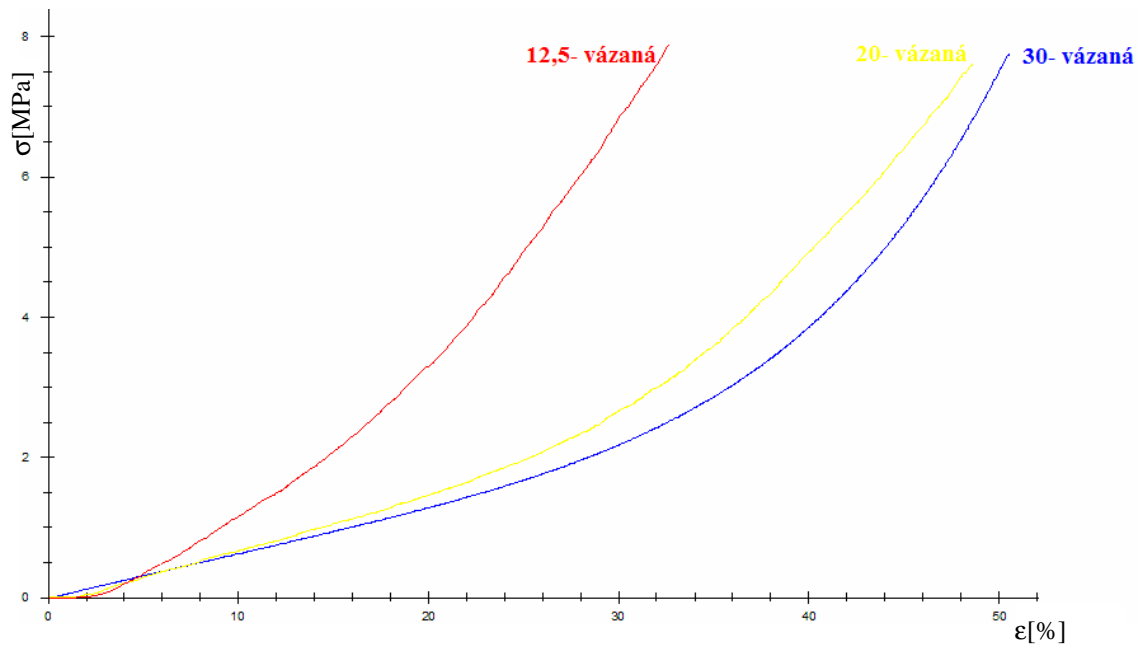
Tab. 16. Rozměry tělesa 8



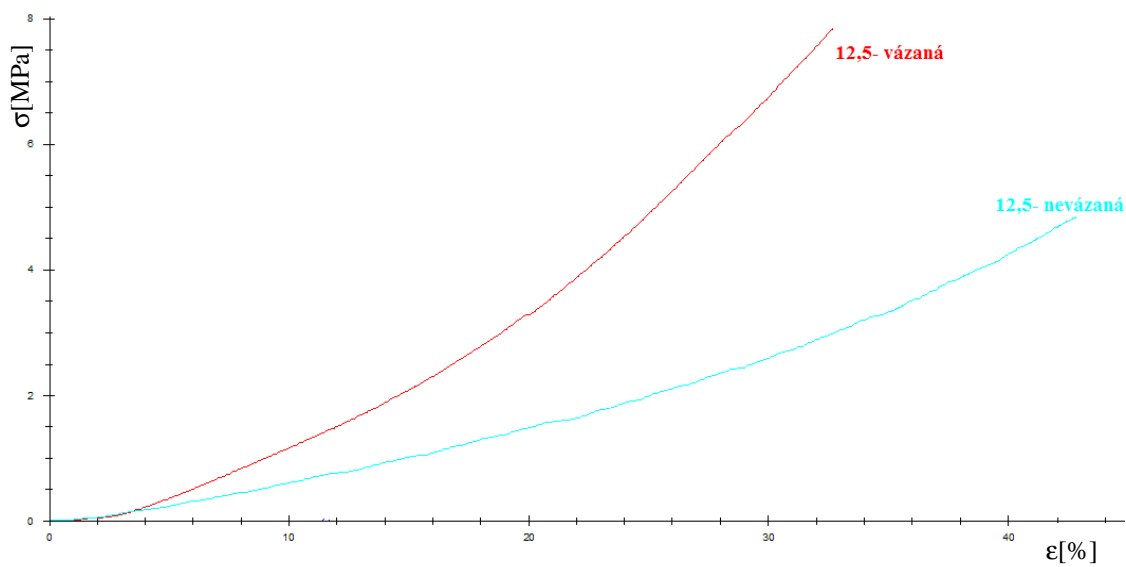
Obr. 42. Závislost napětí na deformaci tělesa 8

Zkušební těleso 8			
F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
3803,01	38,86	41,21	4,55

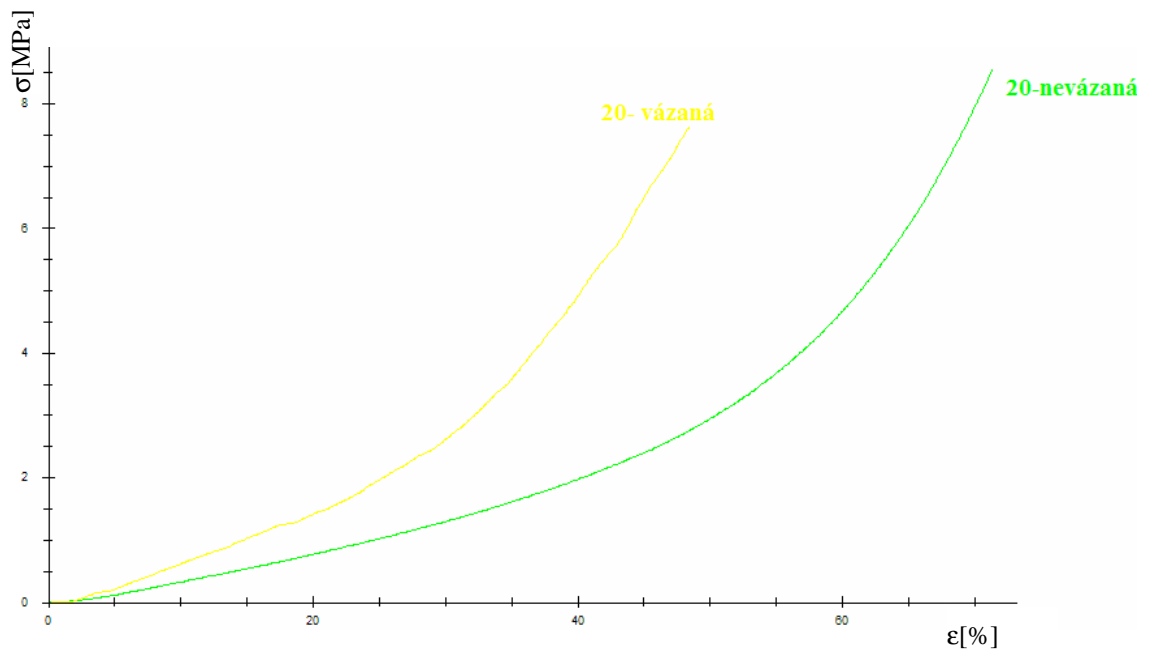
Tab. 17. Experimentální hodnoty tělesa 8



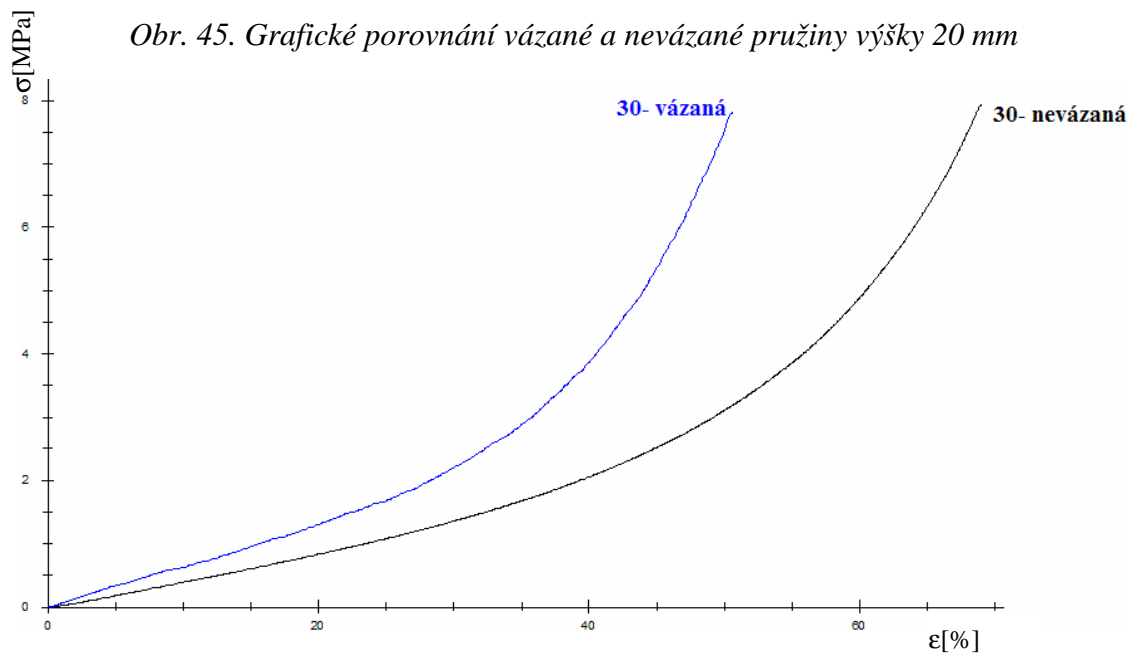
Obr. 43. Grafické srovnání vázaných pružin plného průřezu



Obr. 44. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny výšky 12,5 mm



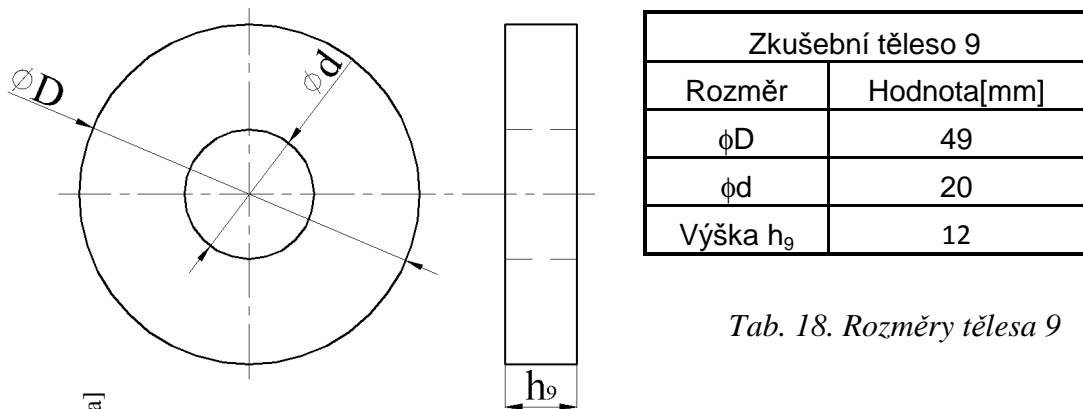
Obr. 45. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny výšky 20 mm



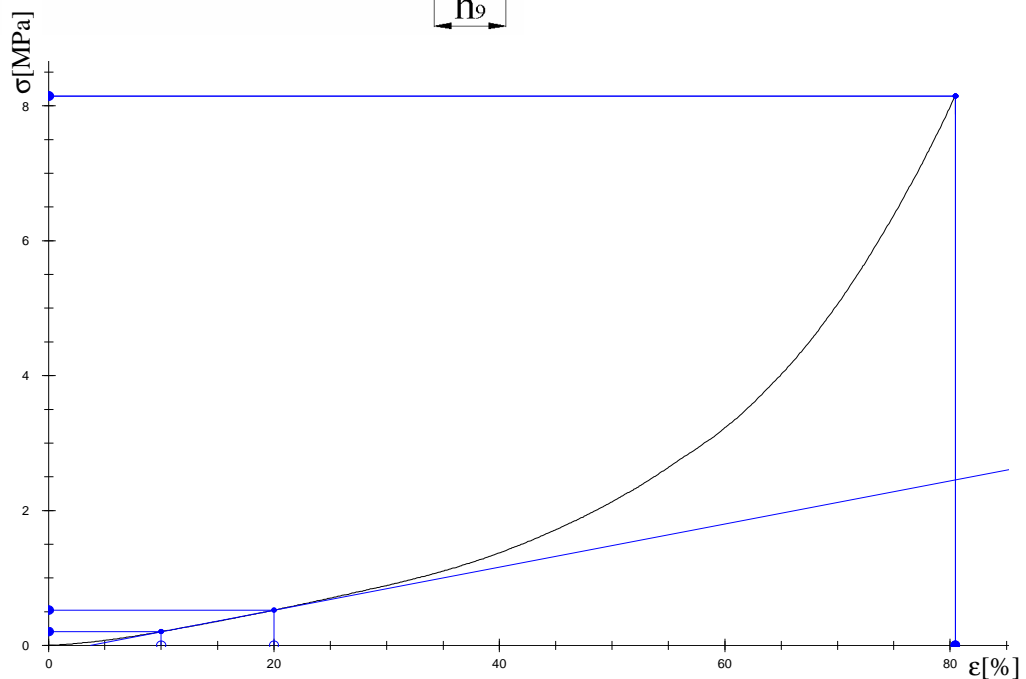
Obr. 46. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny výšky 30 mm

10.2.3 Výsledky tlakových zkoušek nevázaných válcových elastomerních pružin s kruhovou dírou

Zkušební těleso 9



Tab. 18. Rozměry tělesa 9

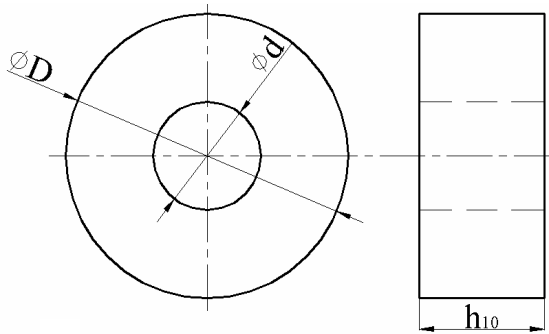


Obr. 47. Závislost napětí na deformaci tělesa 9

Zkušební těleso 9				
Měření	F[N]	ε[%]	δ[mm]	E[MPa]
1	16108,94	80,14	9,52	3,25
2	15854,6	80,46	8,47	3,19
3	15946,86	80,32	8,54	3,22
4	15896,36	80,38	8,45	3,24
5	15925,54	80,25	8,37	3,26
Průměr	15946,46	80,31	8,67	3,23
Odchylka	97,19	0,12	0,48	0,03

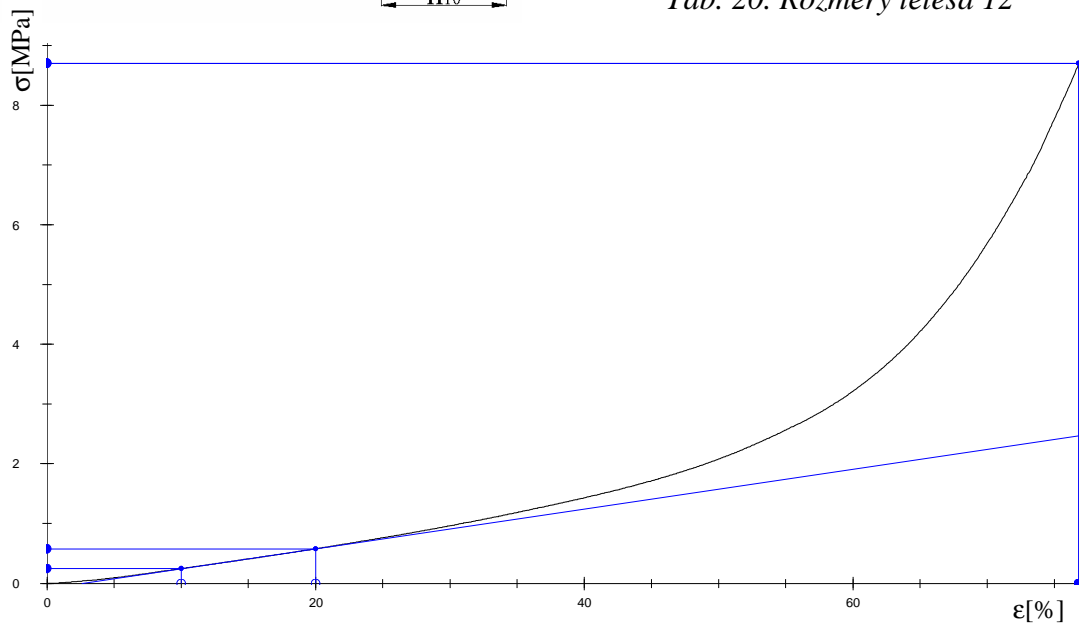
Tab. 19. Experimentální hodnoty tělesa 9

Zkušební těleso 10



Zkušební těleso 10	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
ϕd	20
Výška h_{10}	20

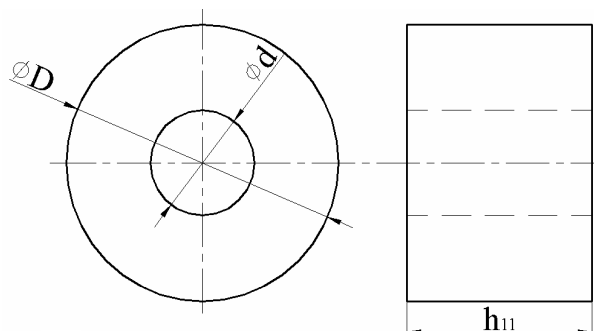
Tab. 20. Rozměry tělesa 12



Obr. 48. Závislost napětí na deformaci tělesa 10

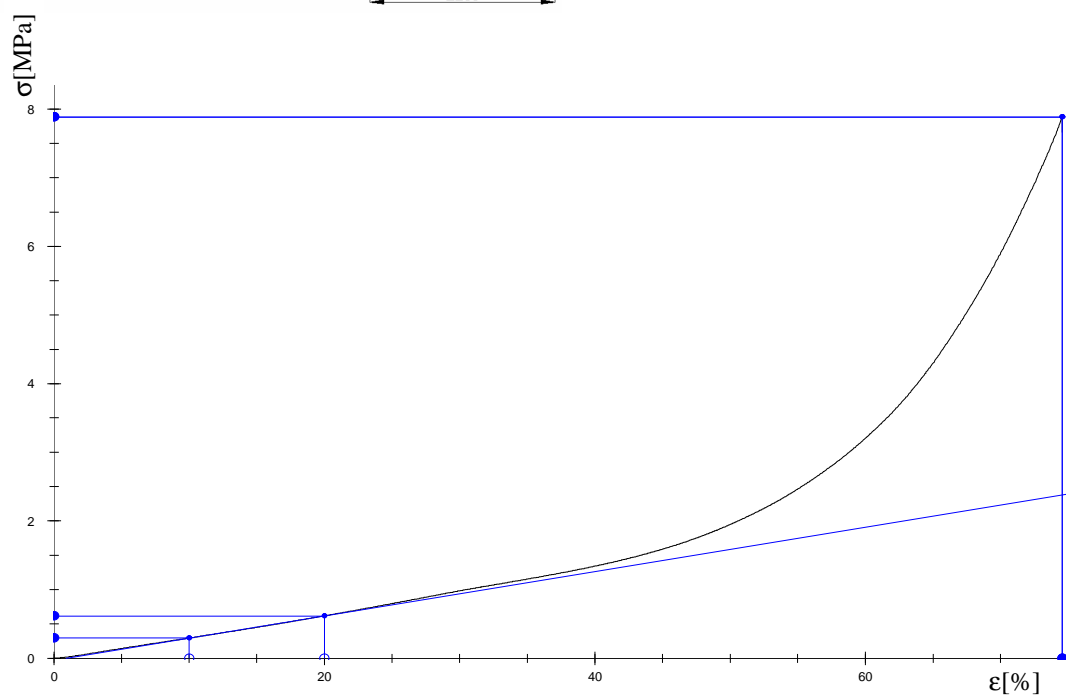
Zkušební těleso 10				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	16954,51	76,8	15,02	3,33
2	14507,76	74,26	13,73	3,26
3	15525,32	75,28	14,20	3,27
4	15482,95	75,42	14,56	3,29
5	15871,42	76,2	14,87	3,3
Průměr	15668,39	75,59	14,48	3,29
Odchylka	879,95	0,97	0,52	0,03

Tab. 21. Experimentální hodnoty tělesa 10

Zkušební těleso 11


Zkušební těleso 11	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
ϕd	20
Výška h_{11}	30

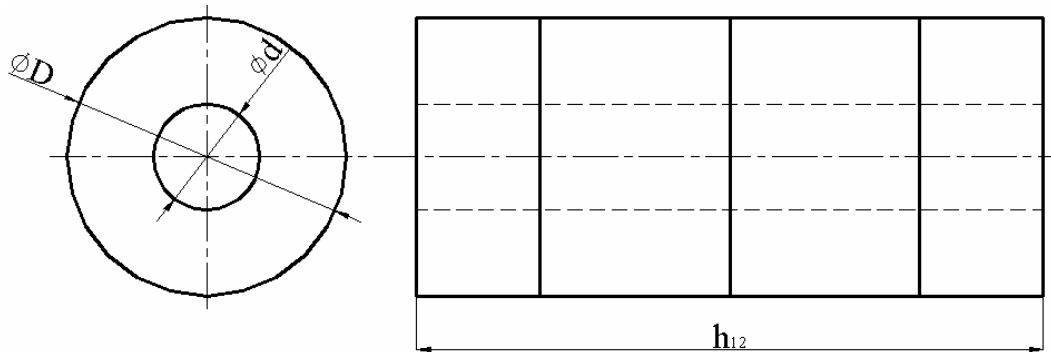
Tab. 22. Rozměry tělesa 11



Obr. 49. Závislost napětí na deformaci tělesa 11

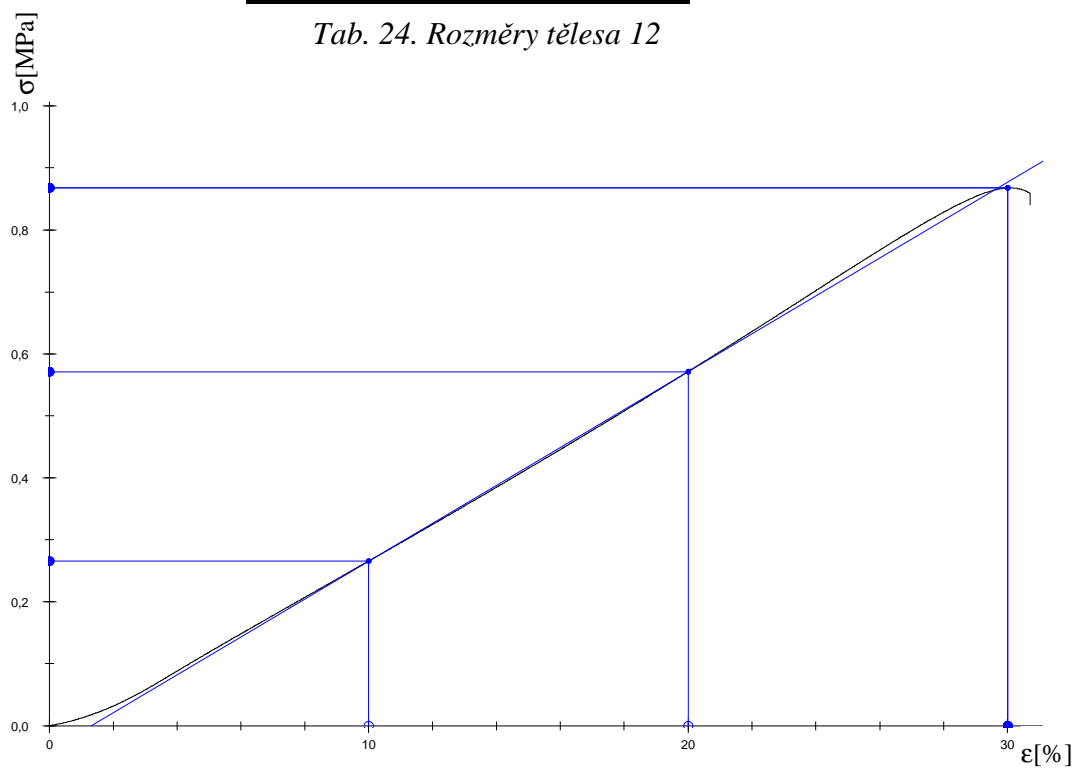
Zkušební těleso 11				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	14535,98	72,92	21,76	3,32
2	15359,47	74,55	22,89	3,23
3	15268,35	73,45	21,92	3,28
4	15132,45	73,28	22,07	3,22
5	15027,29	73,14	22,54	3,18
Průměr	15064,71	73,47	22,24	3,25
Odchylka	321,67	0,64	0,47	0,05

Tab. 23. Experimentální hodnoty tělesa 11

Zkušební těleso 12


Zkušební těleso 12	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
ϕd	20
Výška h_{12}	100

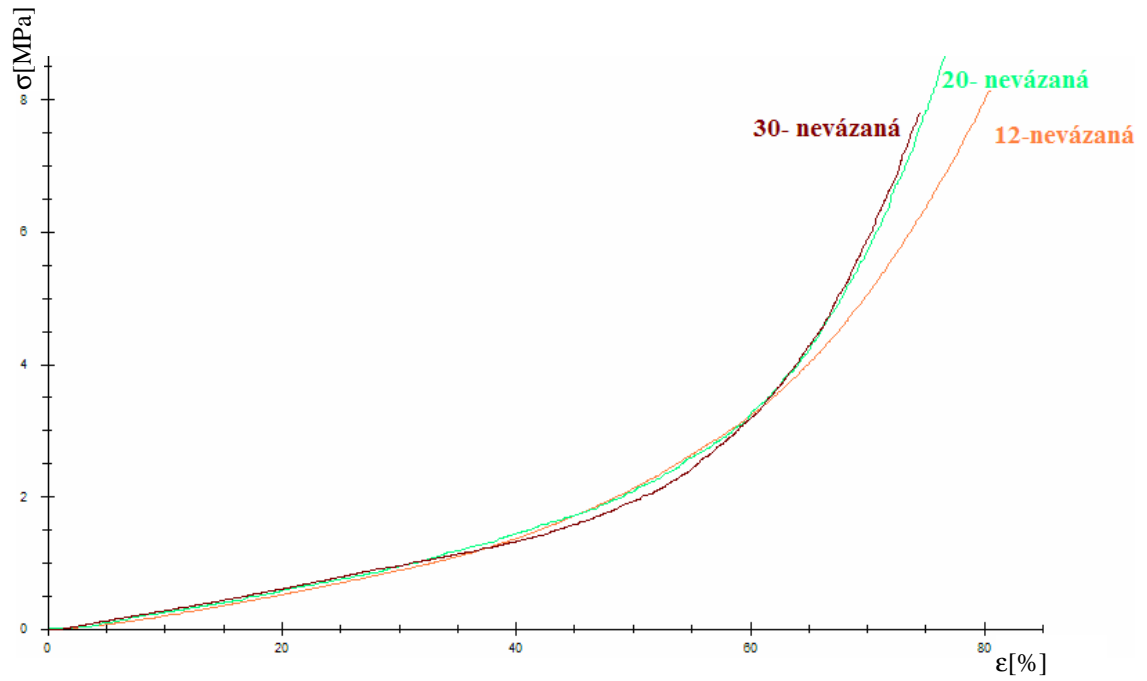
Tab. 24. Rozměry tělesa 12



Obr. 50. Závislost napětí na deformaci tělesa 12

Zkušební těleso 12			
F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1690,04	30,01	30,42	3,06

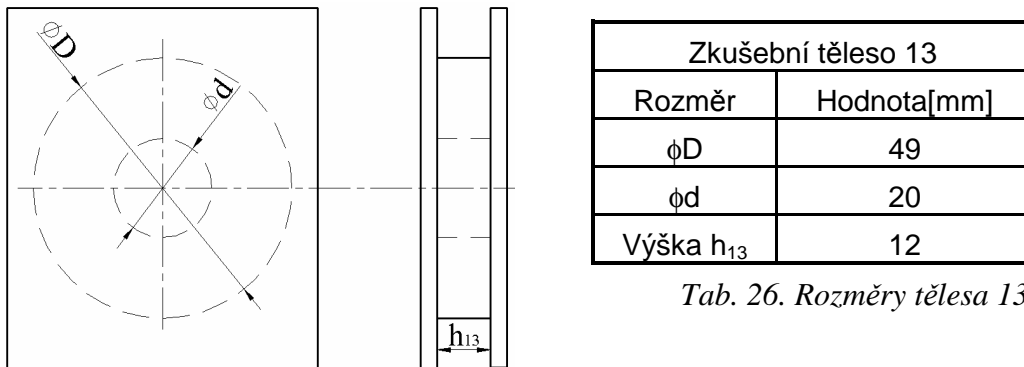
Tab. 25. Experimentální hodnoty tělesa 12



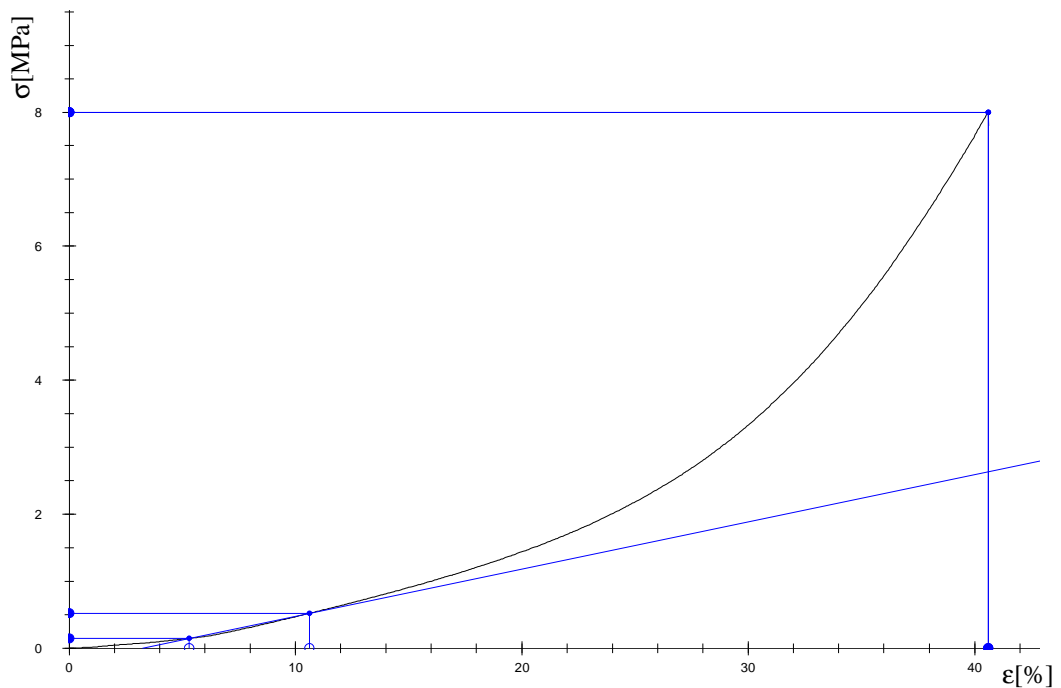
Obr. 51. Grafické srovnání nevázaných pružin s kruhovým otvorem

10.2.4 Výsledky tlakových zkoušek vázaných válcových elastomerních pružin s kruhovou dírou

Zkušební těleso 13



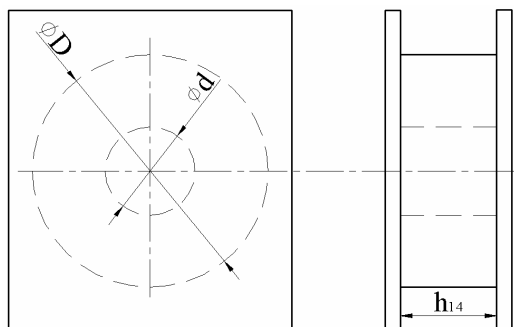
Tab. 26. Rozměry tělesa 13



Obr. 52. Závislost napětí na deformaci tělesa 13

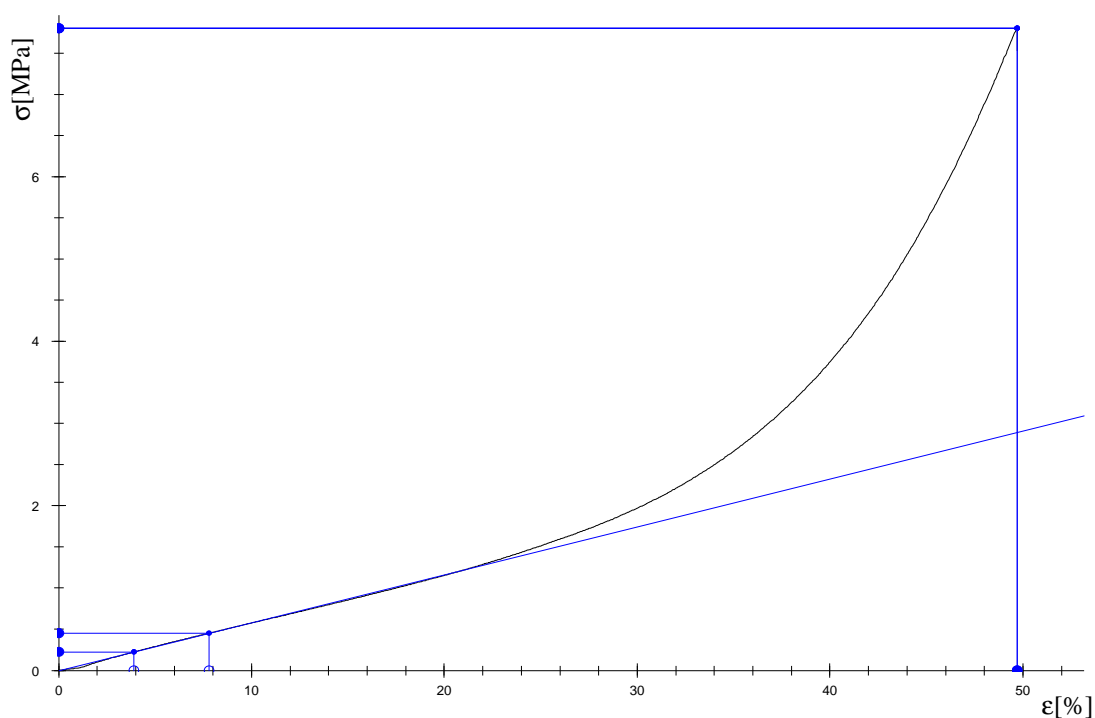
Zkušební těleso 13				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	15580,64	40,59	7,64	7,04
2	15658,08	39,59	7,37	7,83
3	15625,32	40,22	7,52	7,42
4	15648,42	40,34	7,56	7,59
5	15592,33	39,97	7,41	7,63
Průměr	15620,96	40,14	7,50	7,50
Odchylka	33,90	0,38	0,11	0,30

Tab. 27. Experimentální hodnoty tělesa 13

Zkušební těleso 14

Zkušební těleso 14	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
ϕd	20
Výška h_{14}	20

Tab. 28. Rozměry tělesa 14

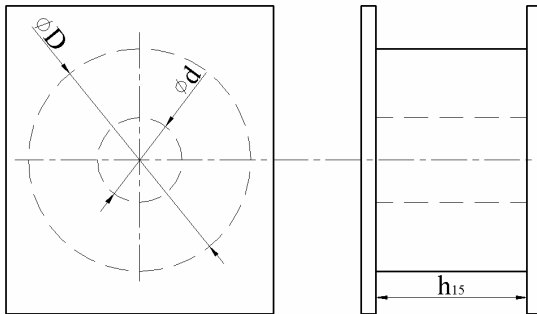


Obr. 53. Závislost napětí na deformaci tělesa 14

Zkušební těleso 14				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	15152,29	49,94	13,09	5,61
2	15200,4	49,69	12,75	5,83
3	15178,36	49,85	12,65	5,92
4	15187,96	49,79	12,61	5,81
5	15192,84	49,72	12,58	5,79
Průměr	15182,37	49,80	12,74	5,79
Odchylka	18,62	0,10	0,21	0,11

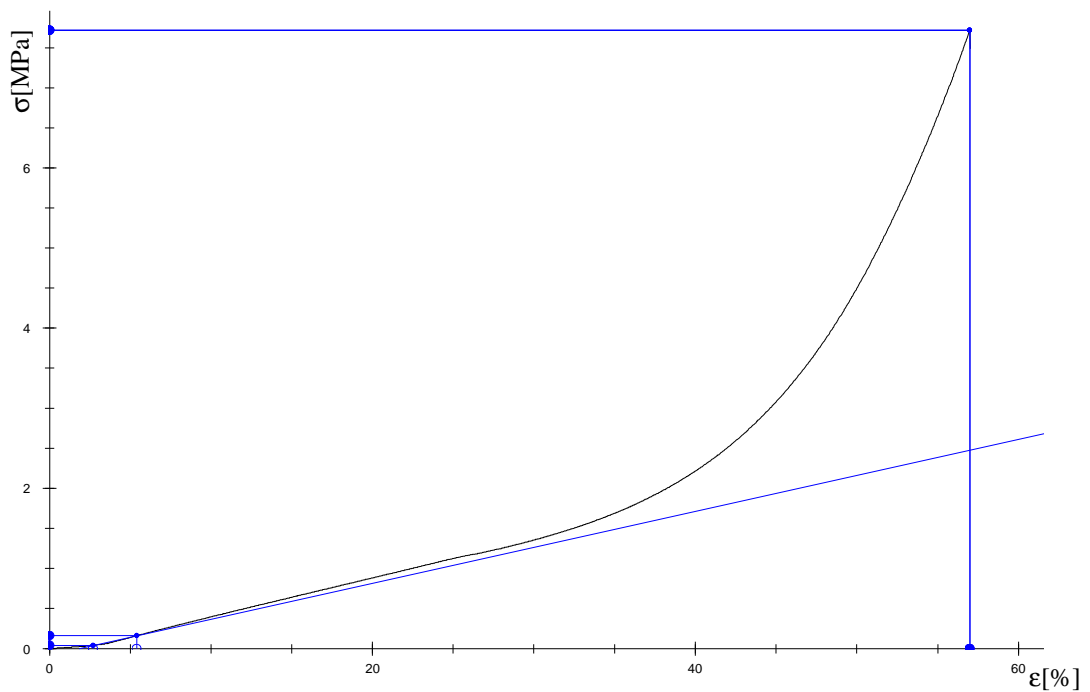
Tab. 29. Experimentální hodnoty tělesa 14

Zkušební těleso 15



Zkušební těleso 15	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
ϕd	20
Výška h_{15}	30

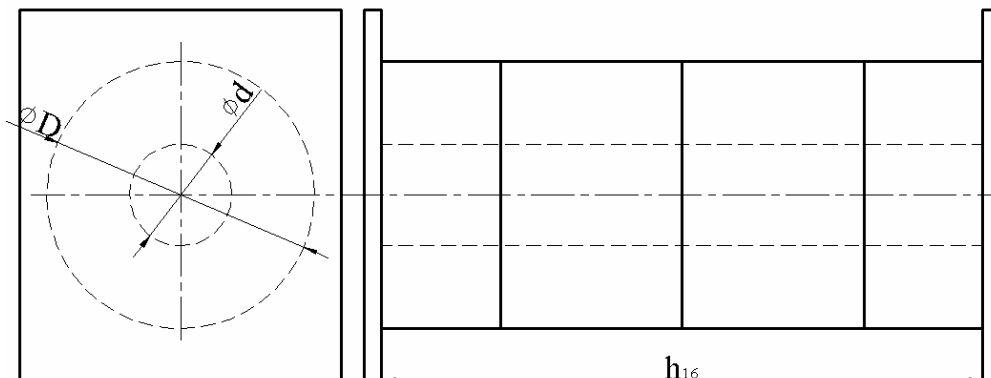
Tab. 30. Rozměry tělesa 15



Obr. 54. Závislost napětí na deformaci tělesa 15

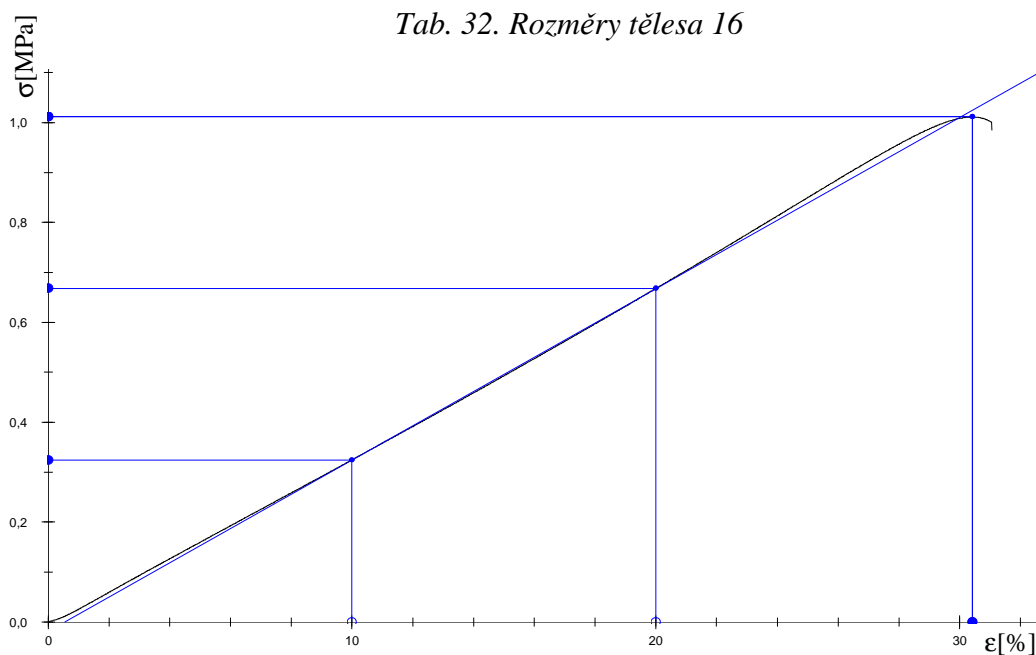
Zkušební těleso 15				
Měření	F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1	14850,07	56	20,81	5,22
2	15040,21	57	21,11	4,49
3	14920,32	56,32	19,85	5,05
4	14870,23	56,41	19,89	4,89
5	14980,86	56,95	20,42	5,12
Průměr	14932,34	56,54	20,42	4,95
Odchylka	78,68	0,43	0,56	0,29

Tab. 31. Experimentální hodnoty tělesa 15

Zkušební těleso 16


Zkušební těleso 15	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
ϕd	20
Výška h_{16}	100

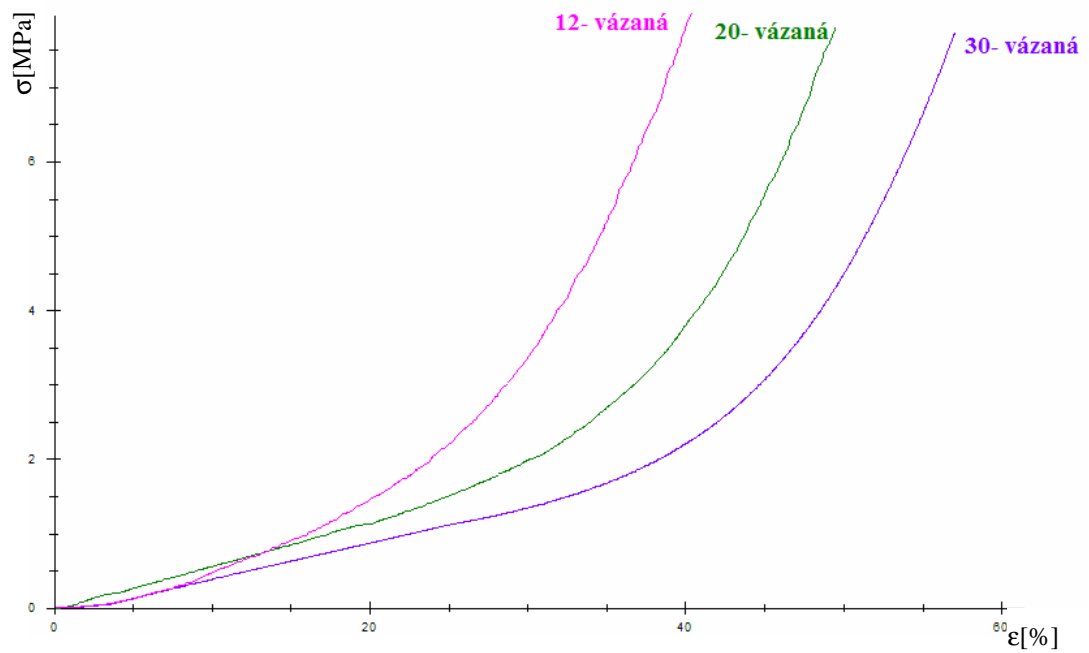
Tab. 32. Rozměry tělesa 16



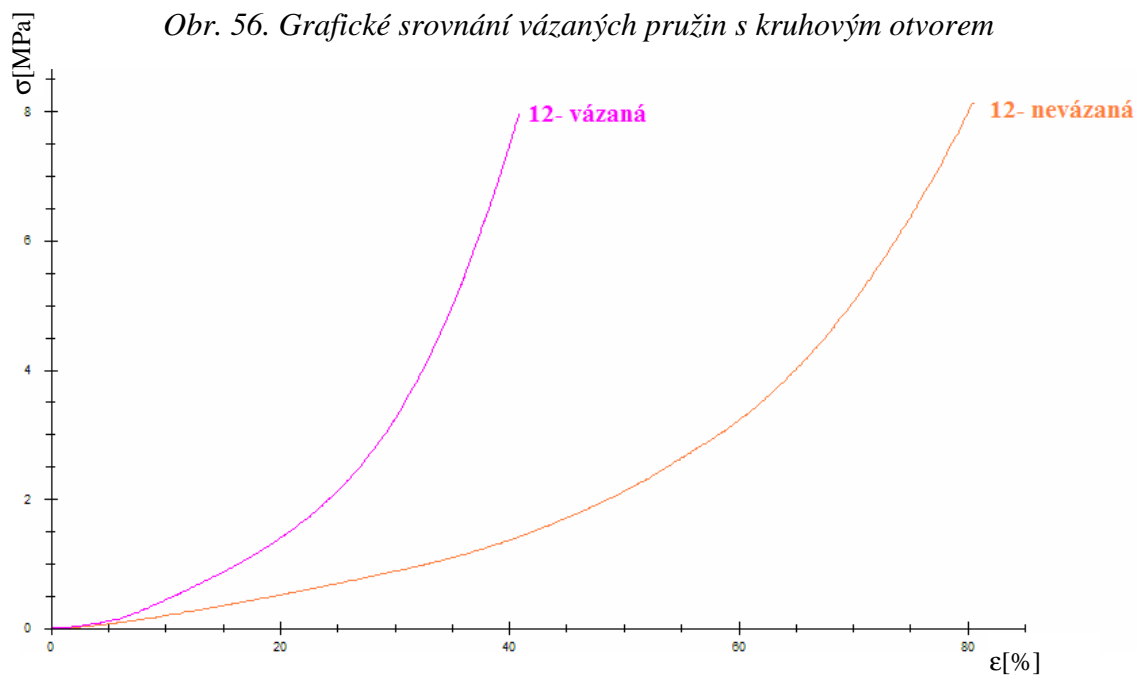
Obr. 55. Závislost napětí na deformaci tělesa 16

Zkušební těleso 16			
F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
1970,4	30,42	31,87	3,43

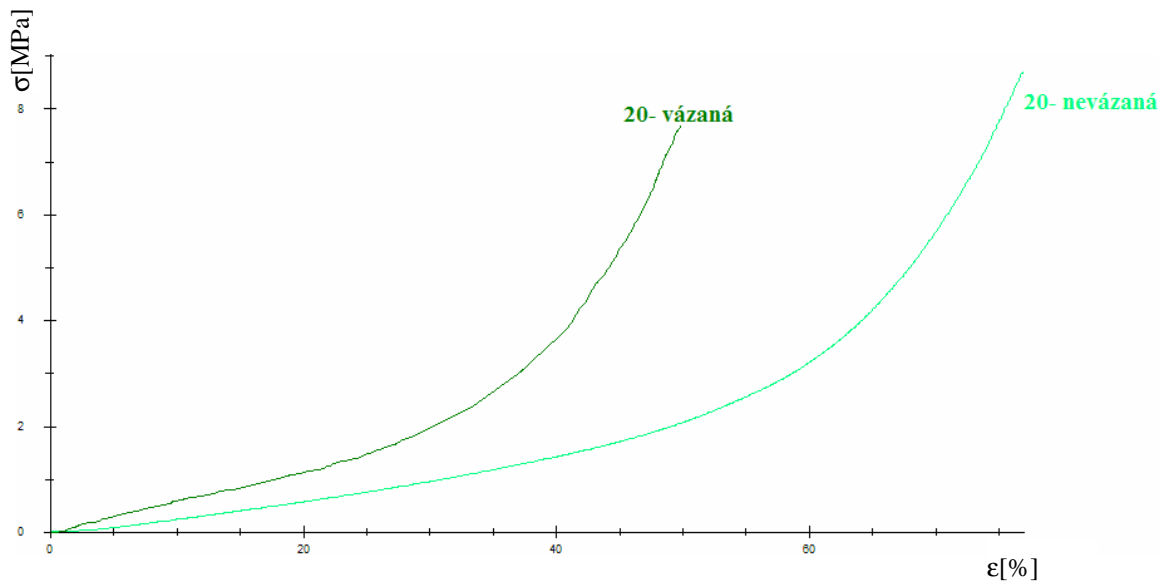
Tab. 33. Experimentální hodnoty tělesa 16



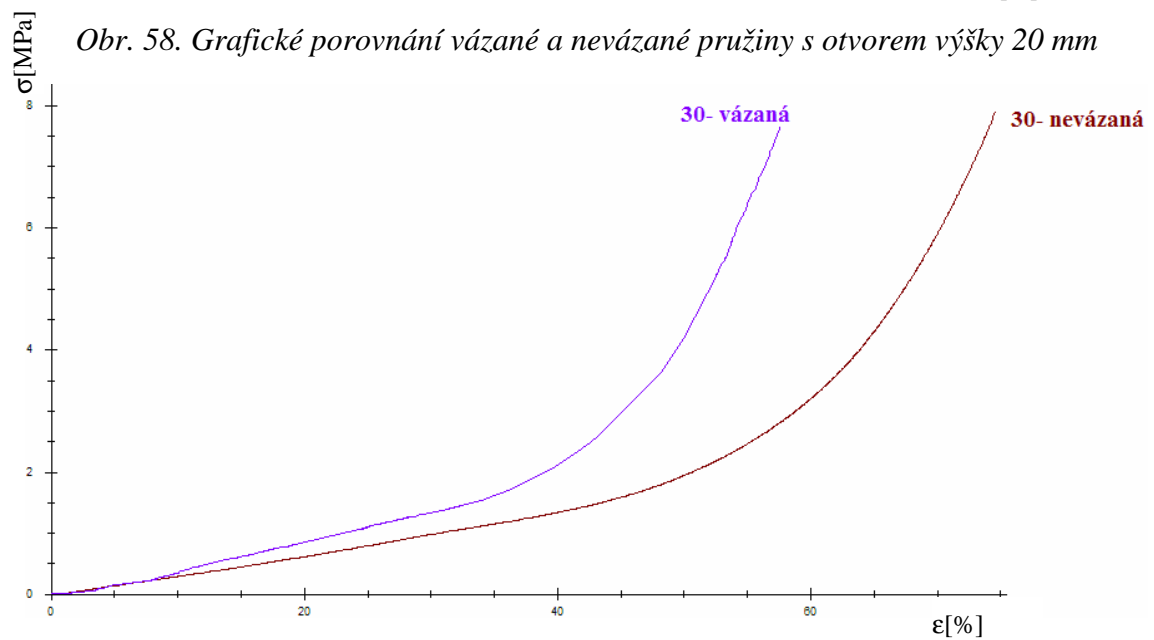
Obr. 56. Grafické srovnání vázaných pružin s kruhovým otvorem



Obr. 57. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny s otvorem výšky 12 mm



Obr. 58. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny s otvorem výšky 20 mm



Obr. 59. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny s otvorem výšky 30 mm

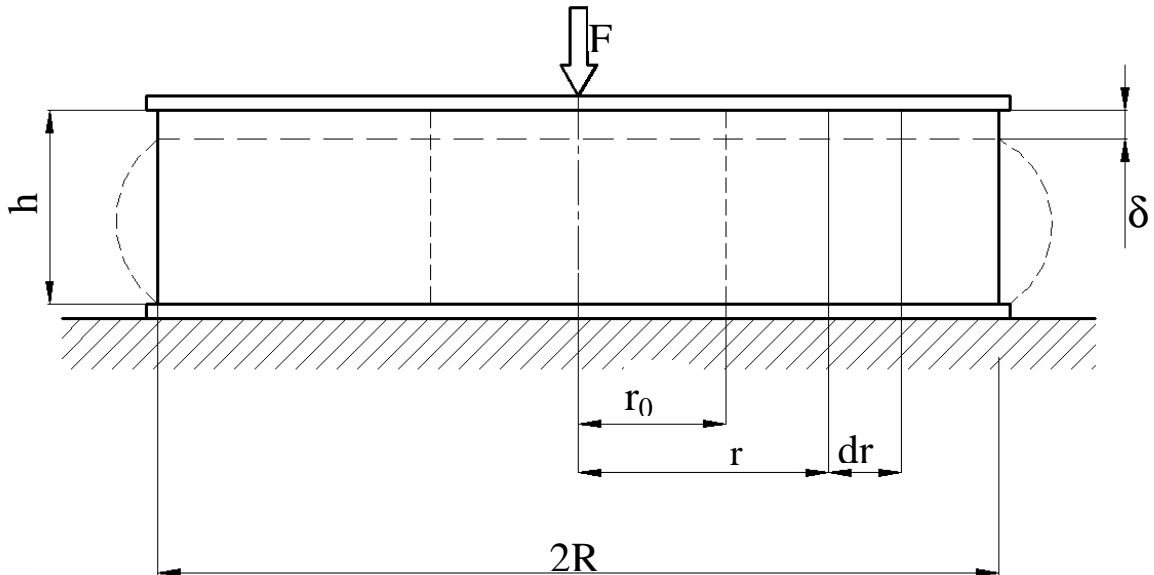
10.3 Zhodnocení výsledků tlakové zkoušky

Experimentální tlakové zkoušky byly rozděleny do dvou základních skupin a to na tlakové zkoušky pružin nevázaných, což znamená, které neobsahují plechové elementy, a pružin vázaných, které jsou opatřeny plechovými elementy.

Výsledky zkoušek byly měřeny pomocí stroje Zwick 1456, který je úzce synchronizován s PC v laboratoři UVI, a pomocí PC byly výsledky získány.

Pro technickou praxi tedy platí, že čím nižší je výška vázaných elastomerních pružin, tak tím vyšší je tvarová funkce, která vyjadřuje poměrné zvýšení tuhosti pryžového prvku.

11 ANALYTICKÉ ODVOZENÍ VZTAHU PRO VÝPOČET TVAROVÉ FUNKCE A TVAROVÉHO FAKTORU CYLINDRICKÉ VÁZANÉ ELASTOMERNÍ PRUŽINY S KRUHOVÝM OTVOREM



Obr. 60. Schéma tlakové válcové pružiny s dírou

Při porovnání se stlačováním volného válce jednoosým napětím se vliv tuhé vazby s ocelovými plechy projeví vyšší tuhostí, a to jako důsledek bránění volným radiálním deformacím v oblasti vazby. [14]

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\delta}{h} \quad (81)$$

Zavádíme smykové napětí τ_{rz} , které představuje náhradu účinku ocelových částí. Tato napětí budou přímo úměrná normálové složce a závislá na relativní radiální pořadnici r/h . [14]

Pokud považujeme poměr r/h jako lineární, tak [14]

$$\tau_{rz} \approx E \cdot \frac{\delta}{h} \cdot \frac{r}{h} \quad (82)$$

Z rovnice rovnováhy elementu pryžového bloku je [14]:

$$2 \cdot \tau_{rz} dr = h dp(r)$$

tj.

$$\tau_{rz} \approx \frac{h}{2} \cdot \frac{dp(r)}{dr} \quad (83)$$

Veličina $p(r)$ je hodnota tlaku, který charakterizuje tok pryže při zatěžování, tato hodnota je hodnota normálového napětí. [14]

A tedy:

$$dp = \frac{2 \cdot E \cdot \delta \cdot r}{h^3} dr \quad (84)$$

Hodnota tlaku v místě r :

$$p(r) = \frac{2 \cdot E \cdot \delta}{h^3} \int_{r_0}^r r dr = \frac{2 \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \left[\frac{r^2}{2} \right]_{r_0}^r + C = \frac{E \cdot \delta \cdot (r^2 - r_0^2)}{h^3} + C \quad (85)$$

V $r=R$ je $p(R) = 0$, a tedy:

$$C = -\frac{E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)}{h^3} \quad (86)$$

Celková síla F , která je potřebná ke stlačení pryžkovového válcového prvku je dána integrací normálových napětí po zatížené ploše prvku [14]:

$$F = F_o + F_p \quad (87)$$

$$\begin{aligned} F_p &= \int_{r_0}^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot p(r) dr = \int_{r_0}^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{E \cdot \delta \cdot (r^2 - r_0^2)}{h^3} dr = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \int_{r_0}^R r \cdot (r^2 - r_0^2) dr = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \int_{r_0}^R (r^3 - r \cdot r_0^2) dr = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \left[\frac{r^4}{4} - \frac{r^2 \cdot r_0^2}{2} \right]_{r_0}^R = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \left[\left(\frac{R^4}{4} - \frac{R^2 \cdot r_0^2}{2} \right) - \left(\frac{r_0^4}{4} - \frac{r_0^2 \cdot r_0^2}{2} \right) \right] = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \left[\frac{R^4 - 2 \cdot R^2 \cdot r_0^2}{4} - \frac{r_0^4}{4} + \frac{2 \cdot r_0^4}{4} \right] = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \frac{R^4 - 2 \cdot R^2 \cdot r_0^2 + r_0^4}{4} = \\ &= \frac{\pi \cdot E \cdot \delta}{h^3} \cdot \frac{(R^2 - r_0^2)^2}{2} = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)^2}{2 \cdot h^3} \end{aligned} \quad (88)$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)^2}{2 \cdot h^3} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} F_o &= \int_{r_0}^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma_z dr = \int_{r_0}^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot E \cdot \frac{\delta}{h} dr = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h} \cdot \int_{r_0}^R r \cdot dr = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h} \cdot \left[\frac{r^2}{2} \right]_{r_0}^R = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta}{h} \cdot \left[\frac{R^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right] = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)}{h} \end{aligned} \quad (90)$$

$$F_o = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)}{h} \quad (91)$$

Celková síla je:

$$\begin{aligned} F &= F_o + F_p = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)}{h} + \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)^2}{2 \cdot h^3} = \\ &= \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)}{h} \cdot \left(1 + \frac{(R^2 - r_0^2)}{2 \cdot h^2} \right) = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot (R^2 - r_0^2)}{h} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot (R^2 - r_0^2)}{2 \cdot h^2} \right) = \\ &= F_o \cdot (1 + 2 \cdot f^2) \end{aligned} \quad (92)$$

$$\frac{F}{F_o} = \phi(f)$$

Tvarový faktor pro tento případ je:

$$f = \frac{\text{Plocha zatížená}}{\text{Plocha nezatížená}} = \frac{\pi \cdot (R^2 - r_0^2)}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h} = \frac{\pi \cdot (R - r_0) \cdot (R + r_0)}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot (R + r_0)} = \frac{R - r_0}{2 \cdot h} \quad (92)$$

Výraz $\Phi(f)$ je funkcí tzv. tvarového faktoru, což je podíl zatížené plochy a povrchu volné pryže tlakové pružiny. V tomto případě válcové pružiny je [14] :

Tvarová funkce je tedy:

$$\phi(f) = 1 + 2 \cdot f^2 \quad (94)$$

Tvarová funkce je vyjádřením poměrného zvýšení tuhosti pryžového prvku vlivem vazby na ocelové části. [14]

11.1 Závěr analytického odvození

Z výše provedených výpočtů vázané elastomerní pružiny průřezu s kruhovým otvorem je patrné, že při porovnání s pružinou plného průřezu, je princip výpočtu velmi podobný, jen je třeba brát v potaz existenci kruhového otvoru.

Rozdíl lze shledat především ve výsledku odvození tvarového faktoru, který je pro tento případ na první pohled rozdílný od tvarového faktoru elastomerní pružiny plného kruhového průřezu.

Ale při odvození tvarové funkce bylo při výpočtu zjištěno, že výsledek je identický, jako pro případ cylindrické pružiny plného průřezu.

Závěrem lze tedy obecně říci, že výsledky tvarových faktorů cylindrických pružin se liší dle daného konkrétního průřezu (plný, s otvorem), ale tvarové funkce cylindrických pružin jsou shodné.

12 ANALYTICKÝ VÝPOČET TVAROVÝCH FUNKCÍ A TVAROVÝCH FAKTORŮ PRUŽIN PODROBENÝCH EXPERIMENTU

V této kapitole bude proveden analytický výpočet tvarových funkcí a tvarových faktorů pro vázané tlakové pružiny, které byly podrobeny experimentálnímu řešení. Pro vyšší přehlednost budou tělesa pro výpočet indexovány stejně, jako v experimentální části

práce. Výpočet tvarového faktoru

Tvarový faktor- je podíl zatížené plochy a povrchu volné pryže tlakové pružiny. Tvarový faktor f charakterizuje tvar v rámci geometrie- typu pryžkové tlakové pružiny. [14]

$$f = \frac{\textit{Plocha zatížená}}{\textit{Plocha volná}} \quad (95)$$

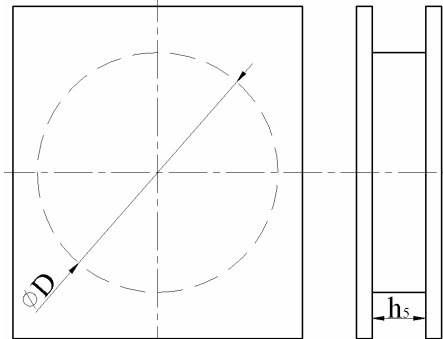
Výpočet tvarové funkce

Tvarová funkce- je vyjádřením poměrného zvýšení tuhosti pryžového prvku vlivem vazby na ocelové části. [14]

$$\phi(f) = 1 + 2 \cdot f^2 \quad (96)$$

12.1 Výpočet vázaných pružin plného průřezu

Zkušební těleso 5



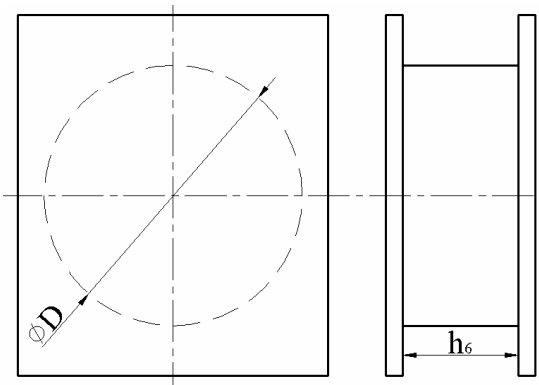
Zkušební těleso 5	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_5	12,5

Tab. 34. Rozměry tělesa 5

$$f_5 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\pi \cdot D \cdot h_5} = \frac{D}{4 \cdot h_5} = \frac{49}{4 \cdot 12,5} = 0,98 \quad (97)$$

$$\phi_5(f_5) = 1 + 2 \cdot f_5^2 = 1 + 2 \cdot 0,98^2 = 2,921 \quad (98)$$

Zkušební těleso 6

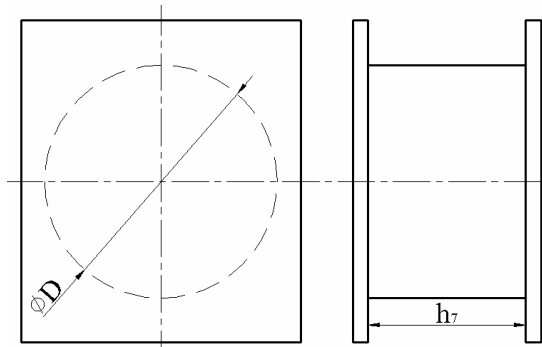


Zkušební těleso 6	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_6	20

Tab. 35. Rozměry tělesa 6

$$f_6 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\pi \cdot D \cdot h_6} = \frac{D}{4 \cdot h_6} = \frac{49}{4 \cdot 20} = 0,613 \quad (99)$$

$$\phi_6(f_6) = 1 + 2 \cdot f_6^2 = 1 + 2 \cdot 0,613^2 = 1,752 \quad (100)$$

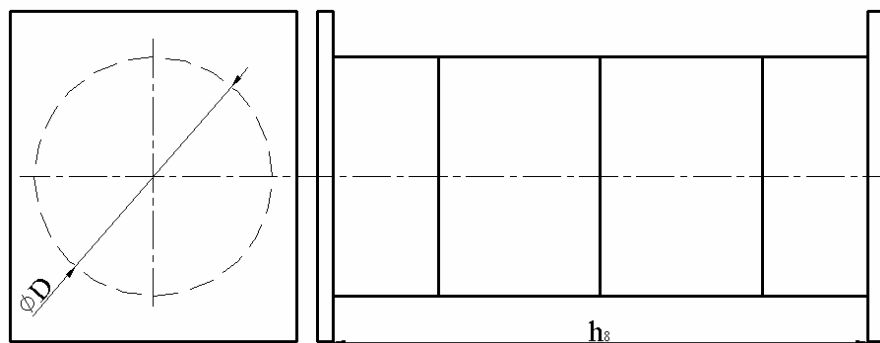
Zkušební těleso 7

Zkušební těleso 7	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_7	30

Tab. 36. Rozměry tělesa 7

$$f_7 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\pi \cdot D \cdot h_7} = \frac{D}{4 \cdot h_7} = \frac{49}{4 \cdot 30} = 0,408 \quad (101)$$

$$\phi_7(f_7) = 1 + 2 \cdot f_7^2 = 1 + 2 \cdot 0,408^2 = 1,333 \quad (102)$$

Zkušební těleso 8

Zkušební těleso 8	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_8	100

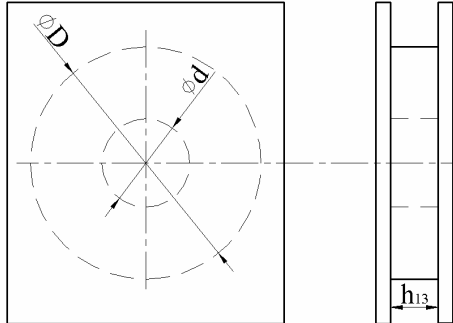
Tab. 37. Rozměry tělesa 8

$$f_8 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}{\pi \cdot D \cdot h_8} = \frac{D}{4 \cdot h_8} = \frac{49}{4 \cdot 100} = 0,123 \quad (103)$$

$$\phi_8(f_8) = 1 + 2 \cdot f_8^2 = 1 + 2 \cdot 0,123^2 = 1,03 \quad (104)$$

12.2 Výpočet vázaných pružin s kruhovým otvorem

Zkušební těleso 13



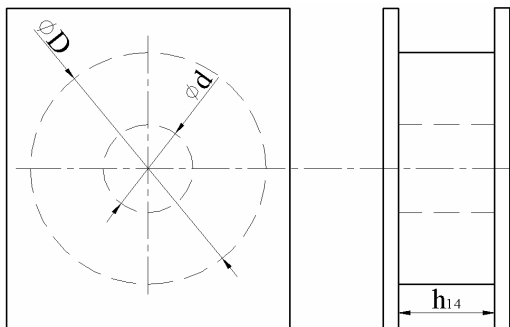
Zkušební těleso 13	
Rozměr	Hodnota[mm]
φD	49
φd	20
Výška h ₁₃	12

Tab. 38. Rozměry tělesa 13

$$f_{13} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot h_{13} + \pi \cdot d \cdot h_{13}} = \frac{D - d}{4 \cdot h_{13}} = \frac{49 - 20}{4 \cdot 12} = 0,604 \quad (105)$$

$$\phi_{13}(f_{13}) = 1 + 2 \cdot f_{13}^2 = 1 + 2 \cdot 0,604^2 = 1,73 \quad (106)$$

Zkušební těleso 14

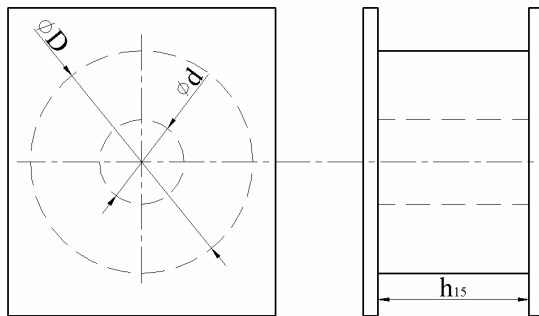


Zkušební těleso 14	
Rozměr	Hodnota[mm]
φD	49
φd	20
Výška h ₁₄	20

Tab. 39. Rozměry tělesa 14

$$f_{14} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot h_{14} + \pi \cdot d \cdot h_{14}} = \frac{D - d}{4 \cdot h_{14}} = \frac{49 - 20}{4 \cdot 20} = 0,363 \quad (107)$$

$$\phi_{14}(f_{14}) = 1 + 2 \cdot f_{14}^2 = 1 + 2 \cdot 0,363^2 = 1,264 \quad (108)$$

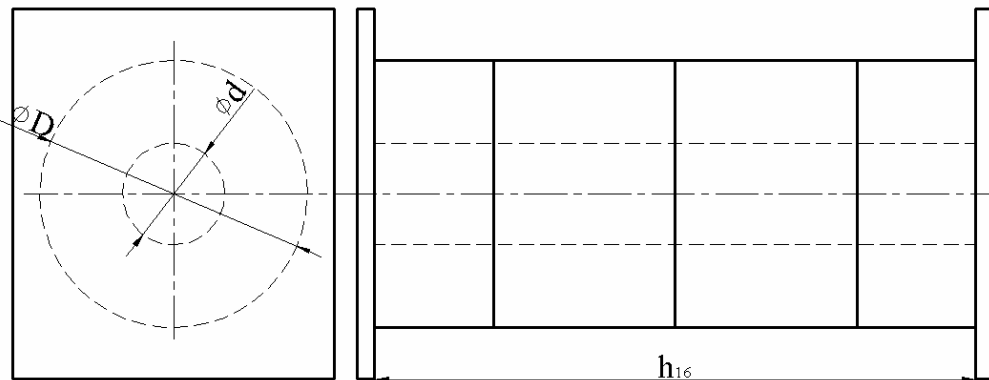
Zkušební těleso 15


Zkušební těleso 15	
Rozměr	Hodnota[mm]
φD	49
φd	20
Výška h ₁₅	30

Tab. 40. Rozměry tělesa 15

$$f_{15} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot h_{15} + \pi \cdot d \cdot h_{15}} = \frac{D - d}{4 \cdot h_{15}} = \frac{49 - 20}{4 \cdot 30} = 0,242 \quad (109)$$

$$\phi_{15}(f_{15}) = 1 + 2 \cdot f_{15}^2 = 1 + 2 \cdot 0,242^2 = 1,117 \quad (110)$$

Zkušební těleso 16


Zkušební těleso 15	
Rozměr	Hodnota[mm]
φD	49
φd	20
Výška h ₁₆	100

Tab. 41. Rozměry tělesa 16

$$f_{16} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot h_{16} + \pi \cdot d \cdot h_{16}} = \frac{D - d}{4 \cdot h_{16}} = \frac{49 - 20}{4 \cdot 100} = 0,073 \quad (111)$$

$$\phi_{16}(f_{16}) = 1 + 2 \cdot f_{16}^2 = 1 + 2 \cdot 0,073^2 = 1,011 \quad (112)$$

13 MODELOVÉ STUDIUM ELASTOMERNÍCH TLAKOVÝCH PRUŽIN V PROGRAMU COSMOS/M

13.1 Lineární FEM modelování

V tomto případě budou vytvořeny modelové studie jednotlivých typů pružin.

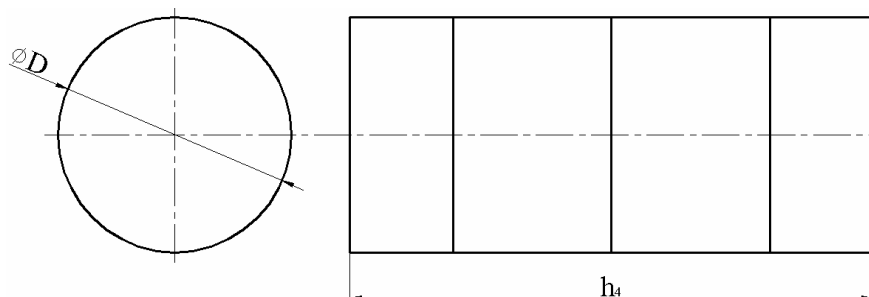
Snahou je, aby jednotlivé pružiny byly, co se tvaru a rozměrů týče, co nejshodnější s pružinami, které byly podrobeny tlakovým zkouškám v případě experimentální části této diplomové práce.

Modelovány budou tedy pružiny vázané, které budou zatíženy tlakem, konkrétně $p = 3 \text{ MPa}$ pro velké deformace a $1,5 \text{ MPa}$ pro malé deformace, pouze při lineárním modelování pružiny výšky 100 mm bude zatížena maximálním tlakem $p = 1,5 \text{ MPa}$ a $0,5 \text{ MPa}$, aby ji bylo možné následně porovnat s experimentem v závěrečné části této práce. Geometrie těchto pružin bude poloviční, protože se jedná o symetrický problém, tudíž není nutné modelovat pružinu celou.

Stěžejní podmínkou lineárního modelování je, aby deformace byly v oblasti lineární elasticity, a tedy aby byla zachována platnost Hookeova zákona: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

13.1.1 Příprava před lineárním modelováním

Zkušební těleso 4



Zkušební těleso 4	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_4	100

Tab. 42. Rozměry tělesa 4

Zkušební těleso 4			
F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
3397,92	38,45	39,02	4,22

Tab. 43. Experimentální hodnoty tělesa 4

V tomto případě byla tlakové zkoušce podrobena nevázaná pružina, složená ze čtyř dílčích těles, vnější okraje byly nalubrikovány z důvodu eliminace tření a z experimentu získaná hodnota E bude následně použita jako jedna z materiálových charakteristik při tvorbě modelových studií daných typů pružin.

Hodnota E činí 4,22 MPa (viz tabulka 43).

Pro lineární modelování tlakové zkoušky pružin je také důležitá hodnota Poissonova čísla ν , které se pohybuje u elastomerních materiálů v rozmezí hodnoty 0,49-0,5.

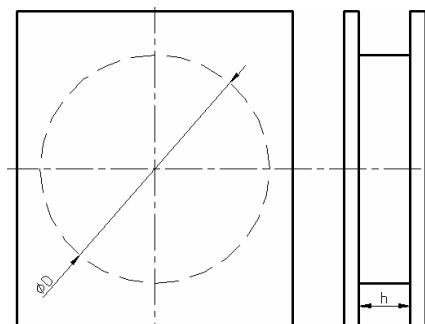
13.1.2 Výsledky lineárního modelování tlakových pružin

V této kapitole budou popsány a vyobrazeny výsledky modelování v oblasti lineární elasticity tlakových elastomerních pružin zatížených tlakem 3 MPa pro velké deformace a 1,5 MPa pro malé deformace, což bude sloužit pro závěrečnou kapitolu, kdy dojde k porovnání modelů s experimentem.

Byly modelovány pružiny o plném cylindrickém průřezu a jednotlivých výškách.

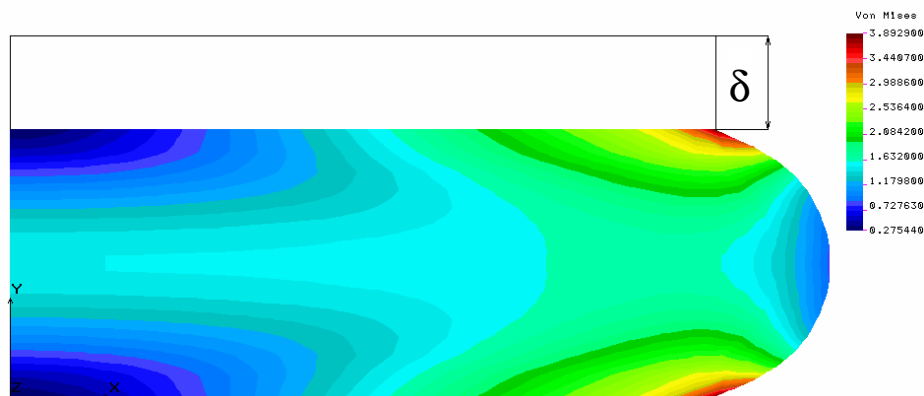
Výsledkem modelového řešení pomocí programu Cosmos/M je vyobrazení průběhu napjatosti Von Mises v tlakové pružině, dále vyobrazená deformace a hodnoty deformace.

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	12,5

Tab. 44. Rozměry lineárně modelované pružiny 1



Obr. 61. Napjatost a deformace pružiny o výšce 12,5 mm

Z výsledku modelového studia této elastomerní tlakové pružiny vyplývá, že maximální napětí je situováno v oblasti krajních rohů pružiny, a to v místech, kde se pryž stýká s ocelovými plechy, a tedy v tomto místě se nachází těsné spojení pryže s kovem (přilepení, navulkanizování), a je zde náhlá změna tuhosti, která má velký vliv na průběh napjatosti v pružině.

Maximální napětí $\sigma_{\text{Von Mises}}$ činí asi 3,89 MPa, a nachází se právě ve výše zmíněných místech.

Pro vysvětlení grafického výsledku obrázku 61 je pružina zobrazena již v deformovaném stavu, a tedy tenké černé čáry reprezentují původní stav a tvar elastomerní tlakové pružiny před zatížením a lineárním výpočtem. Obrázky deformace a průběhu napětí jsou zde vkládány při maximálním zatížení.

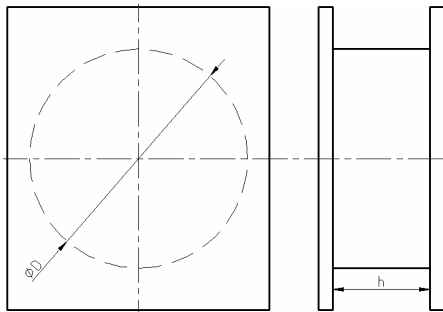
Rozdíl původního tvaru respektive původní výšky s výškou současnou, a tedy po deformaci se rozumí δ , což je hodnota deformace v milimetrech, která bude níže vyobrazena v tabulce.

Tlaková pružina výšky 12,5 mm		
Tlak p[MPa]	Deformace δ [mm]	Napětí $\sigma_{\text{Von Mises}}$ [MPa]
1,5	1,625	1,947
3	3,251	3,893

Tab. 45. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 12,5

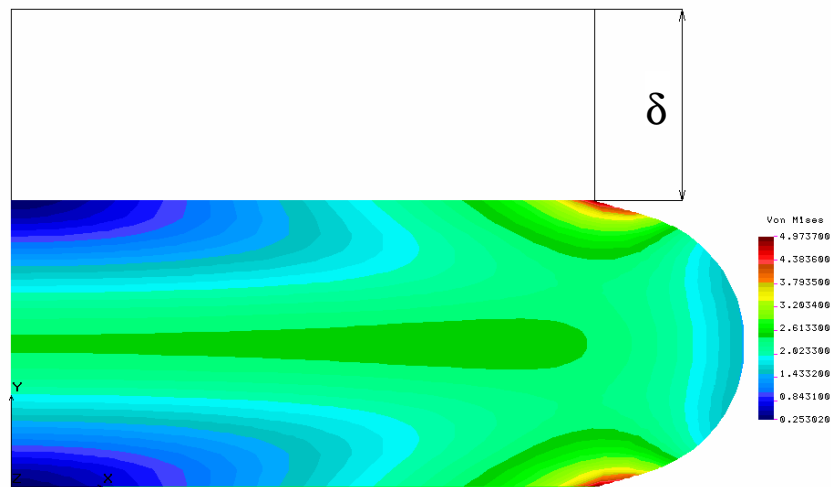
mm

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	20

Tab. 46. Rozměry lineárně modelované pružiny 2

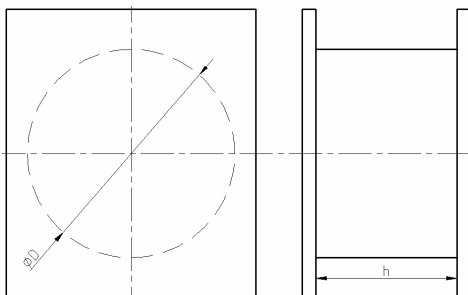


Obr. 62. Napjatost a deformace pružiny o výšce 20 mm

Tlaková pružina výšky 20 mm		
Tlak p[MPa]	Deformace δ [mm]	Napětí $\sigma_{\text{Von Mises}}$ [MPa]
1,5	4,004	2,487
3	8,007	4,974

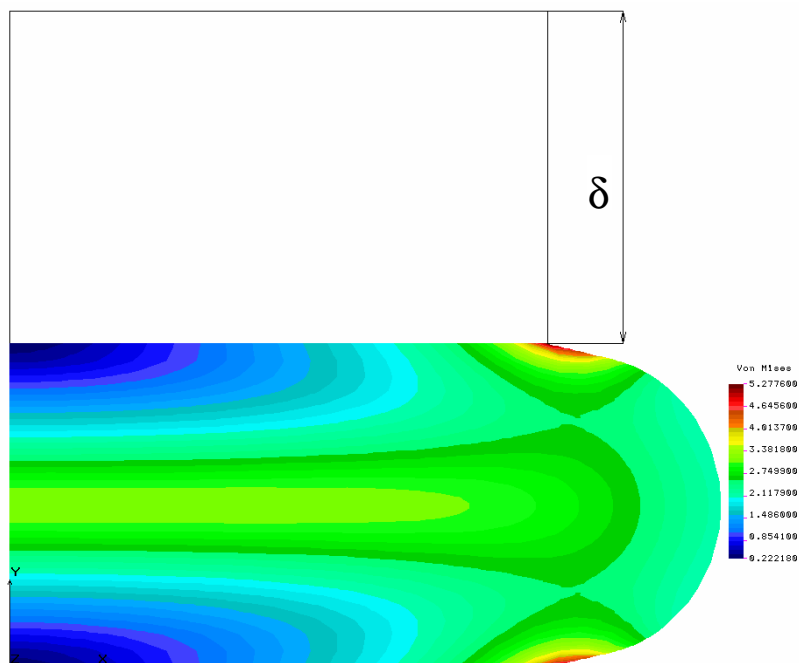
Tab. 47. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 20 mm

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	30

Tab. 48. Rozměry lineárně modelované pružiny 3

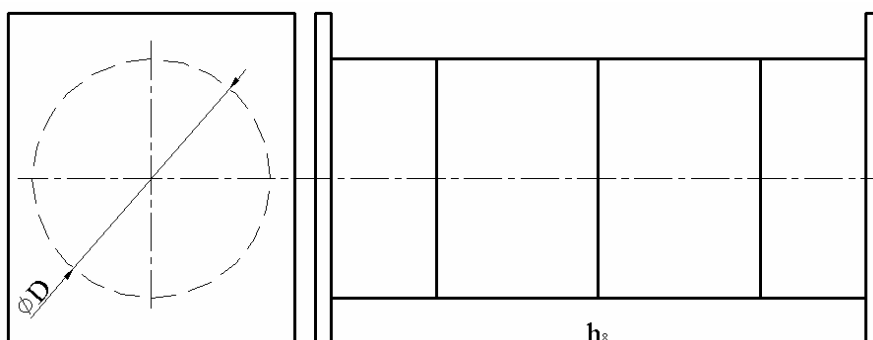


Obr. 63. Napjatost a deformace pružiny o výšce 30 mm

Tlaková pružina výšky 30 mm		
Tlak p[MPa]	Deformace δ [mm]	Napětí $\sigma_{\text{Von Mises}}$ [MPa]
1,5	7,595	2,639
3	15,19	5,278

Tab. 49. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 30 mm

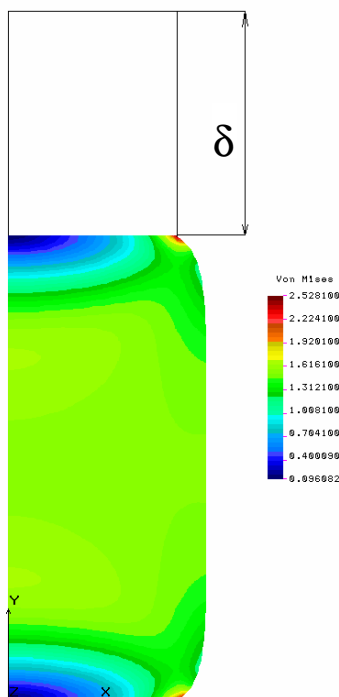
Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	100

Tab. 50. Rozměry lineárně modelované pružiny 4

Tuhost této pružiny je nejmenší ze všech, a tak by bylo zbytečné stlačovat ji tlakem 3 MPa – vznikly by velké deformace a nebylo by možné je porovnat s experimentem, protože tato pružina byla stlačena asi na maximální deformaci 40%, a tak bude stlačena tlakem 0,5 MPa a 1,5 MPa.



Obr. 64. Napjatost a deformace pružiny výšky 100 mm

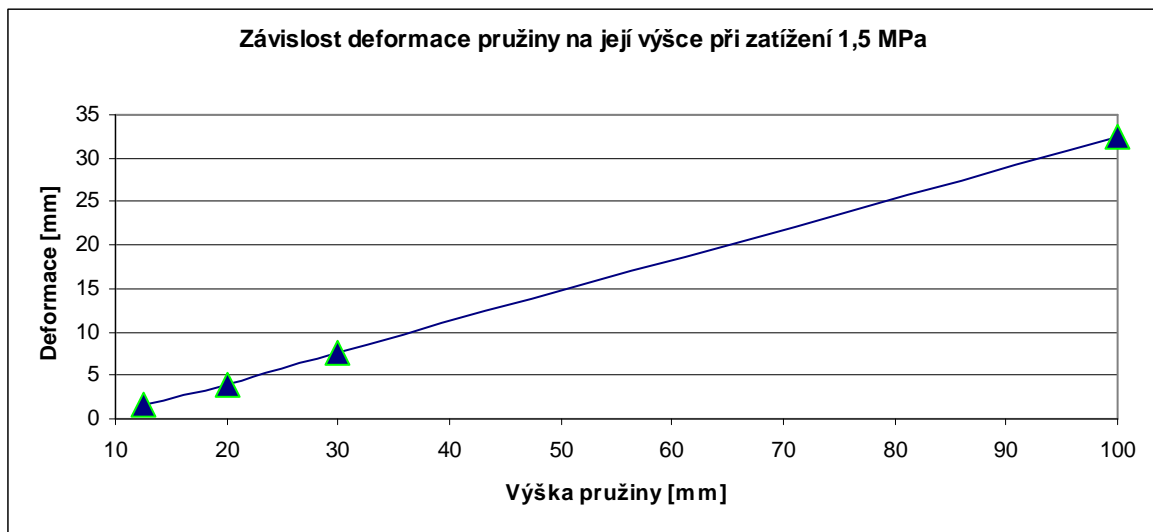
Tlaková pružina výšky 100 mm		
Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]	Napětí $\sigma_{\text{Von Mises}}$ [MPa]
0,5	10,860	0,843
1,5	32,58	2,528

Tab. 51. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 100 mm

13.2 Souhrn a zhodnocení výsledků z lineárních analýz tlakových pružin

V první řadě je z obrázků vyjadřujících průběh napětí při zatížení tlakových cylindrických elastomerních pružin zřejmé, že místa koncentrace napětí o maximálních hodnotách se vyskytují v krajních rozích, a to na rozhraní kde dochází k náhlé změně tuhosti, což je v tomto případě reprezentováno náhlou změnou materiálu, z něhož se pryžokovový prvek skládá, tedy rozhraní ocelový plech- pryž.

Dále byla pomocí výpočtu v programu Cosmos/M zjištěna hodnota deformace δ .



Obr. 65. Graf závislosti deformace na výšce pružiny při $p = 1,5 \text{ MPa}$

13.3 Nelineární FEM modelování

V tomto případě budou jednotlivé pružiny podrobeny nelineárnímu modelování.

Jelikož se jedná o pryžový materiál zkušebních těles, tak pryž jako materiál vykazuje jedinečnou vlastnost vratné deformace, a tedy je nutné při konstrukci výrobků z pryže uvažovat hyperelastické vlastnosti daného materiálu.

Jednotlivé geometrie pružin budou opět modelovány pomocí Cosmos/M, ale nelze použít stejné materiálové charakteristiky, jako ve výše popsaném případě lineárního modelování.

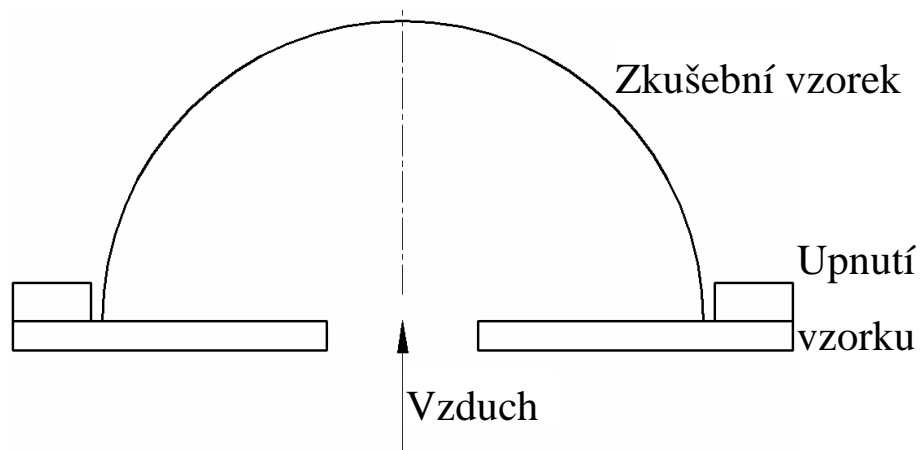
Budou modelovány identické typy pružin jako v případě lineárním, opět se bude jednat o pružiny vázané plného cylindrického průřezu, jejichž geometrie bude poloviční co se průměru týče, a protože se jedná o tlakové pružiny, tak budou zatíženy plošným tlakem $p = 3 \text{ MPa}$. při nelineárním FEM modelování je zahrnuta geometrická a materiálová nelinearita.

13.3.1 Příprava před nelineárním modelováním

Před nelineárním modelováním bylo nutné zjistit pomocí programu MSC. Patran hyperelastické konstanty materiálu, ze kterého byly elastomerní pružiny vyrobeny, a tedy bylo nutné vyrobit zkušební vzorky pro tahovou zkoušku, a zkušební vzorky pro zkoušku nafukování, což je typem zkoušky dvouosého tahu (biaxiální zkouška napjatosti).



Obr. 66. Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku

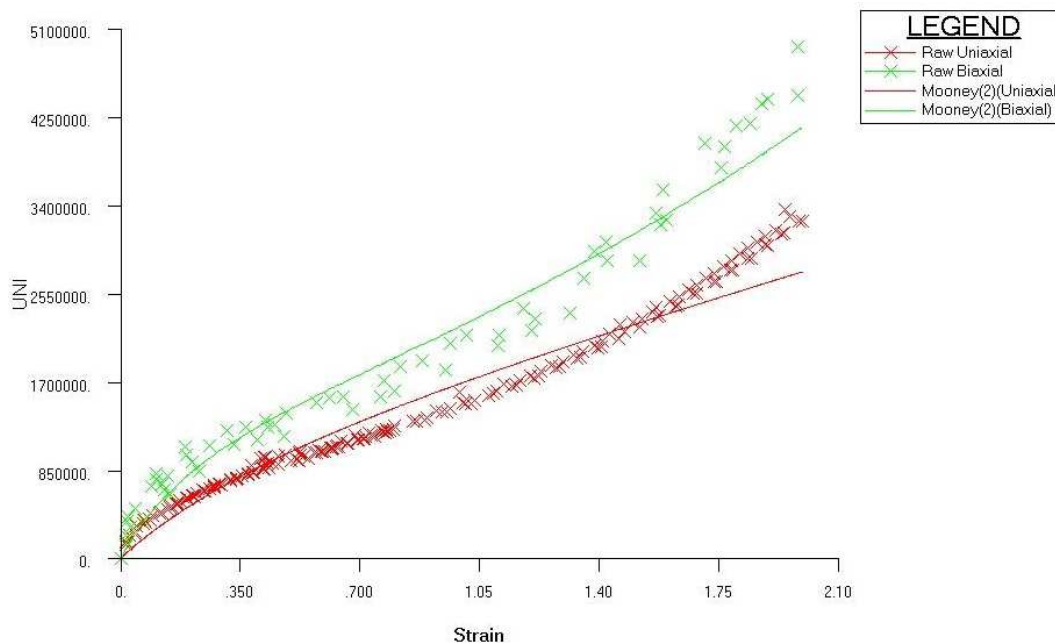


Obr. 67. Schéma zkoušky nafukování

Z důvodu nedostatku materiálu S 1234, byly hodnoty tahové a biaxiální zkoušky převzaty z diplomové práce zabývající se podobnou tematikou:

[16] **BLAŽEK, R. Vliv teploty na mechanické vlastnosti pryžových výrobků** [diplomová práce], UTB, FT Zlín, 2008

Hodnoty získané pomocí tahové zkoušky a biaxiální zkoušky napjatosti byly použity pro nalezení hyperelastických konstant Mooney- Rivlin pomocí programu MSC. Patran a jsou uvedeny v přílohách.



Obr. 68. Dvou-parametrový Mooney- Rivlin

Pomocí programu MSC. Patran byly tedy zjištěny dvě hyperelastické konstanty Mooney A a Mooney B, které budou následně použity pro program Cosmos/M v aplikaci nelineárního modelování.

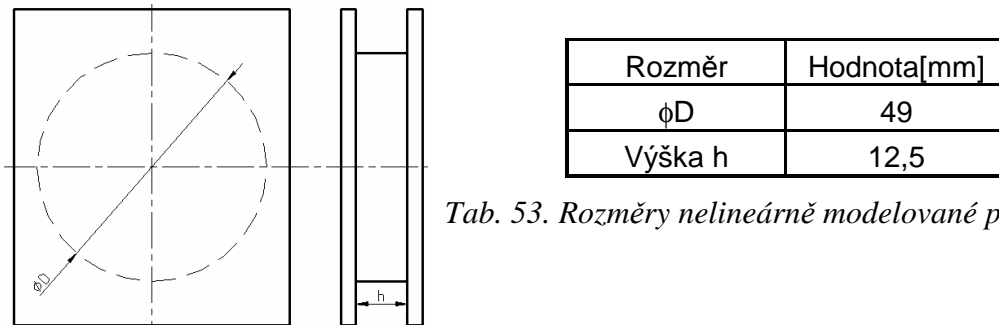
Hyperelastické konstanty	
Konstanta	Hodnota[MPa]
Mooney A	0,469
Mooney B	0,0249

Tab. 52. Hyperelastické konstanty

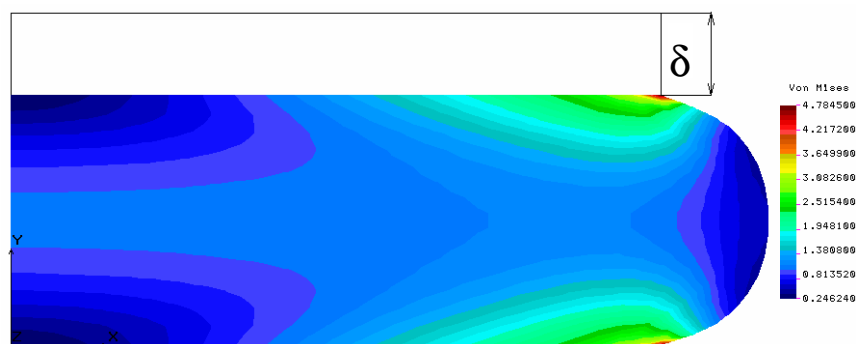
Mooney- Rivlin

13.3.2 Výsledky nelineárního modelování

Modelovaná pružina



Tab. 53. Rozměry nelineárně modelované pružiny 1



Obr. 69. Napjatost a deformace pružiny o výšce 12,5 mm

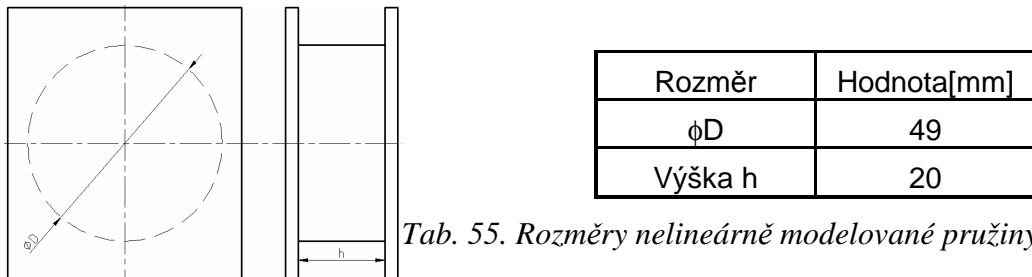
Při tomto nelineárním modelování dochází k postupnému zatěžování tlakovým zatížením o hodnotě 3 MPa v souboru jednotlivých kroků, které budou charakterizovány v následující tabulce. Lze to chápat jako zatěžování od nuly až na maximální hodnotu tlakového zatížení 3 MPa.

Tlaková pružina výšky 12,5 mm		
Krok	Tlak p[MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,3	0,4405
2	0,6	0,8369
3	0,9	1,197
4	1,2	1,528
5	1,5	1,833
6	1,8	2,117
7	2,1	2,381
8	2,4	2,629
9	2,7	2,861
10	3	3,079

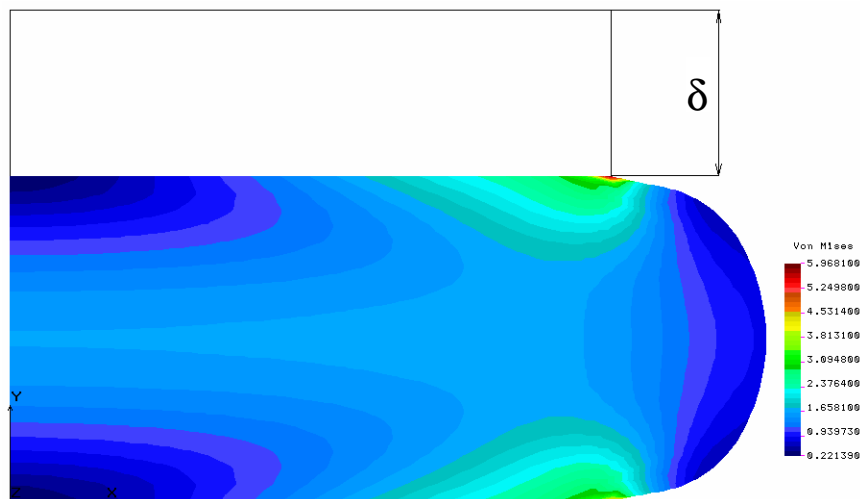
Tab. 54. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 12,5 mm

Z tabulky 54 je možné pozorovat, že daná pružina byla zatížena na maximální hodnotu tlakového zatížení, které činí 3 MPa a deformace pružiny při tomto zatížení je 3,079 mm.

Modelovaná pružina



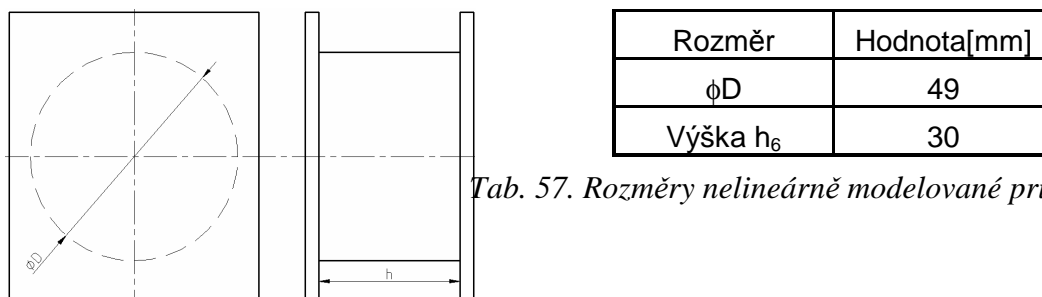
Tab. 55. Rozměry nelineárně modelované pružiny 2



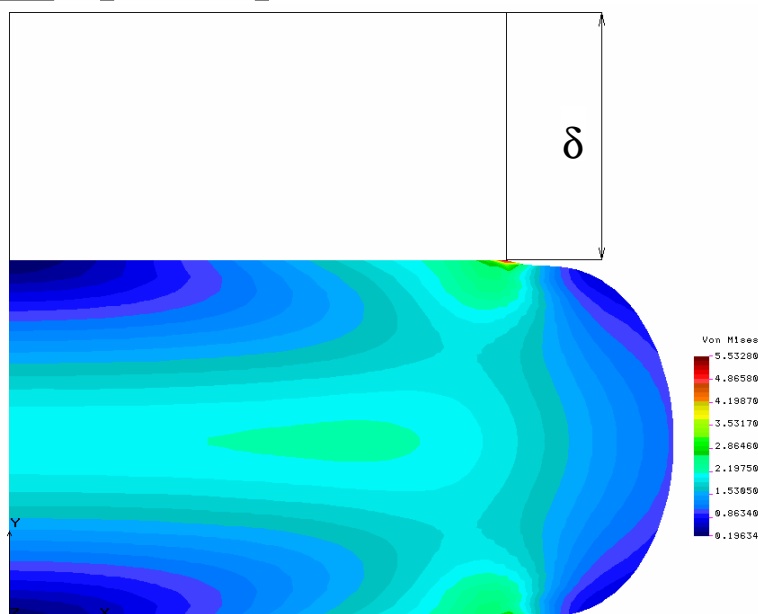
Obr. 70. Napjatost a deformace pružiny o výšce 20 mm

Tlaková pružina výšky 20 mm		
Krok	Tlak p[MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,3	1,066
2	0,6	1,995
3	0,9	2,816
4	1,2	3,553
5	1,5	4,218
6	1,8	4,822
7	2,1	5,37
8	2,4	5,87
9	2,7	6,328
10	3	6,75

Tab. 56. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 20 mm

Modelovaná pružina


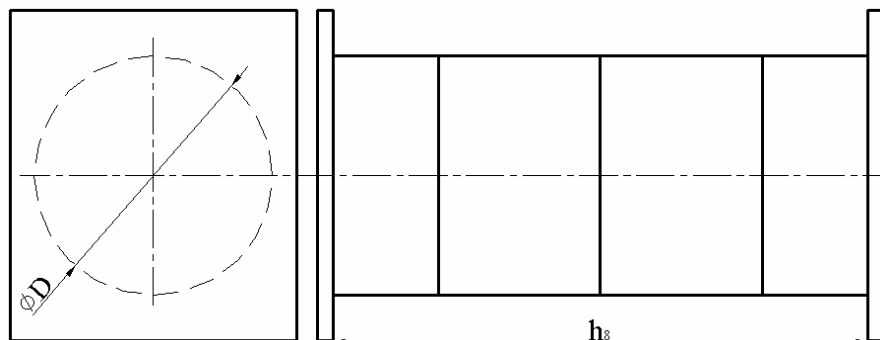
Tab. 57. Rozměry nelineárně modelované pružiny 3



Obr. 71. Napjatost a deformace pružiny o výšce 30 mm

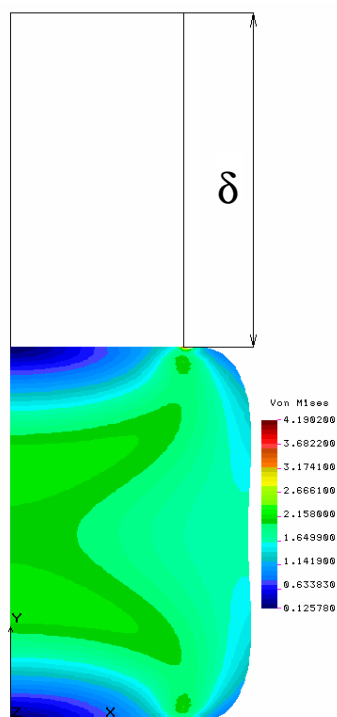
Tlaková pružina výšky 30 mm		
Krok	Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,3	2,007
2	0,6	3,73
3	0,9	5,238
4	1,2	6,578
5	1,5	7,779
6	1,8	8,859
7	2,1	9,832
8	2,4	10,71
9	2,7	11,51
10	3	12,23

Tab. 58. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 30 mm

Modelovaná pružina

Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	100

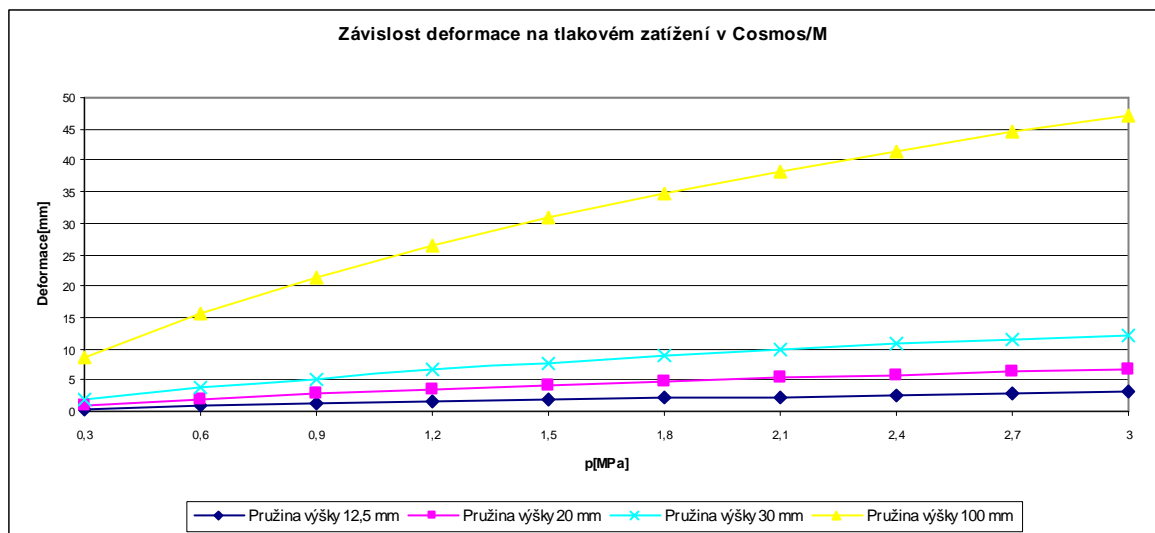
Tab. 59. Rozměry nelineárně modelované pružiny 4



Obr. 72. Napjatost a deformace pružiny výšky 100 mm

Tlaková pružina výšky 100 mm		
Krok	Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,3	8,486
2	0,6	15,53
3	0,9	21,46
4	1,2	26,54
5	1,5	30,96
6	1,8	34,87
7	2,1	38,37
8	2,4	41,55
9	2,7	44,47
10	3	47,18

Tab. 60. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 100 mm



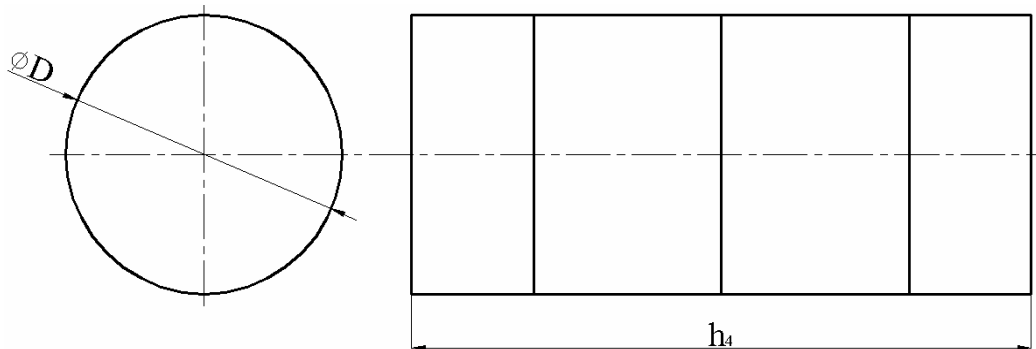
Obr. 73. Graf závislosti deformace na tlakovém zatížení jednotlivých výšek pružin při nelineárním modelování

13.4 Nelineární FEM modelování- Neohookeovský FEM model

13.4.1 Příprava nelineárního(Neohookeovského) modelování

V experimentální části práce byla podrobena tlakové zkoušce následující nevázaná pružina:

Zkušební těleso 4



Zkušební těleso 4	
Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_4	100

Tab. 61. Rozměry tělesa 4

Při tlakové zkoušce byly zjištěny následující hodnoty:

Zkušební těleso 4			
F[N]	ϵ [%]	δ [mm]	E[MPa]
3397,92	38,45	39,02	4,22

Tab. 62. Experimentální hodnoty tělesa 4

Nejdůležitější hodnotou pro tento případ modelování je hodnota modulu pružnosti v tlaku, která je 4,22 MPa.

Neohookeovský model je principiálně shodný s výše provedeným modelováním nelineárním, kde byly dvě hyperelastické konstanty, ale v tomto případě bude použita pouze jedna konstanta, kterou označíme C_{10} .

Z teorie hyperelastického chování(viz kapitola 6) plyne ,že: „ $6C_{10} = E$ “ [14]

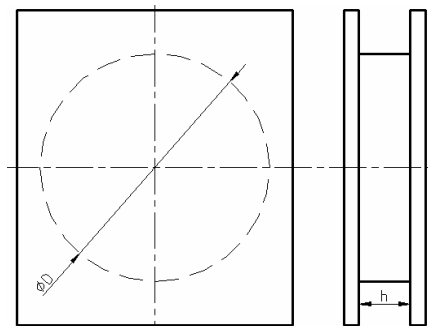
Konstanta C_{10} je tedy:

$$C_{10} = \frac{E}{6} = \frac{4,22}{6} = 0,7033 \text{ MPa} \quad (113)$$

Tato hodnota bude použita v programu Cosmos/M při modelování. Pružiny byly zatíženy plošným tlakem za účelem výsledku poměrné deformace co nejbližšího experimentálnímu řešení, aby bylo opět možné porovnat Neohookeovské modelování s experimentem. Maximální hodnota plošného tlaku činí 5 MPa, u pružiny výšky 100 mm je hodnota 3 MPa.

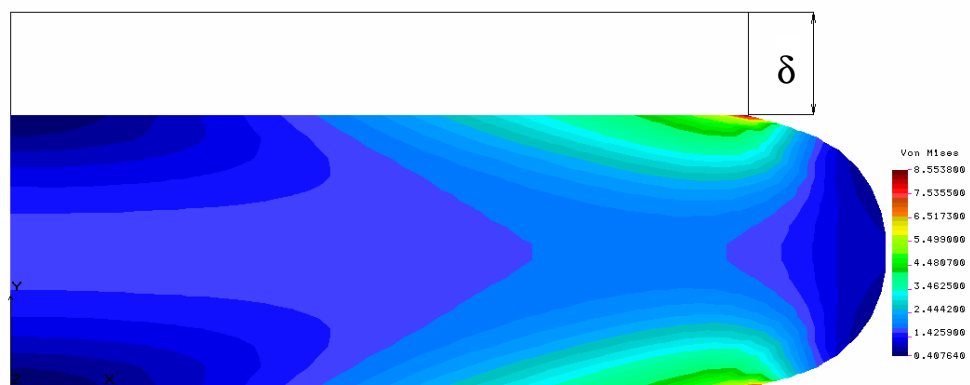
13.4.2 Výsledky nelineárního - Neohookeovského modelování

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	12,5

Tab. 63. Rozměry modelované pružiny 1

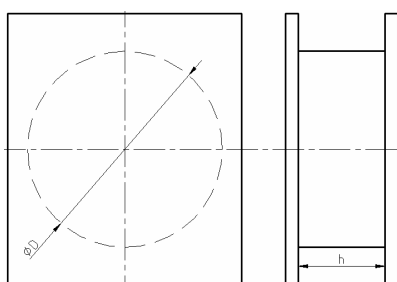


Obr. 74. Napjatost a deformace pružiny výšky 12,5 mm

Tlaková pružina výšky 12,5 mm		
Krok	Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,5	0,5117
2	1	0,9659
3	1,5	1,375
4	2	1,746
5	2,5	2,087
6	3	2,401
7	3,5	2,692
8	4	2,962
9	4,5	3,214
10	5	3,449

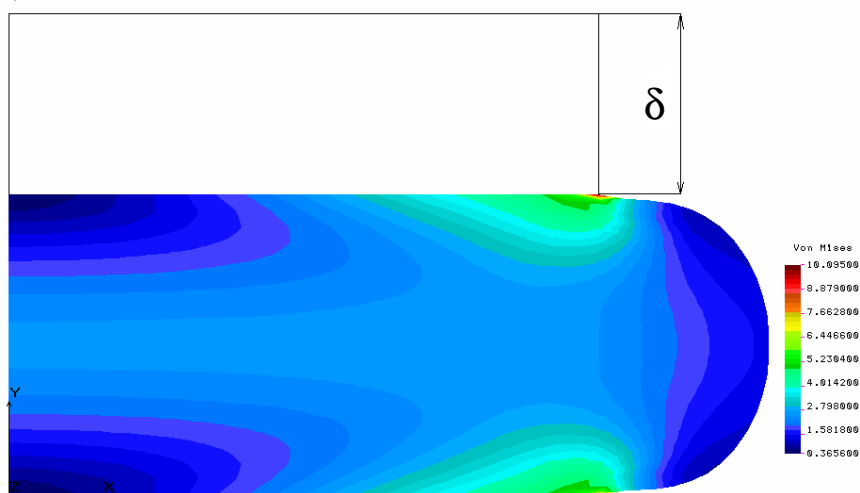
Tab. 64. Výsledky modelování pružiny
výšky 12,5 mm

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	20

Tab. 65. Rozměry modelované pružiny 2

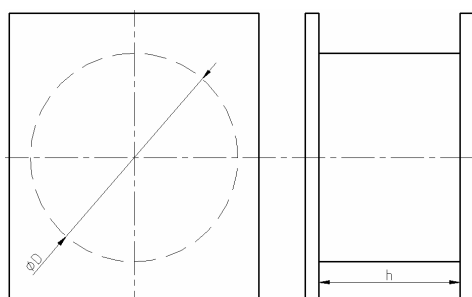


Obr. 75. Napjatost a deformace pružiny výšky 20 mm

Tlaková pružina výšky 20 mm		
Krok	Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,5	1,236
2	1	2,297
3	1,5	3,224
4	2	4,047
5	2,5	4,781
6	3	5,438
7	3,5	6,029
8	4	6,562
9	4,5	7,048
10	5	7,494

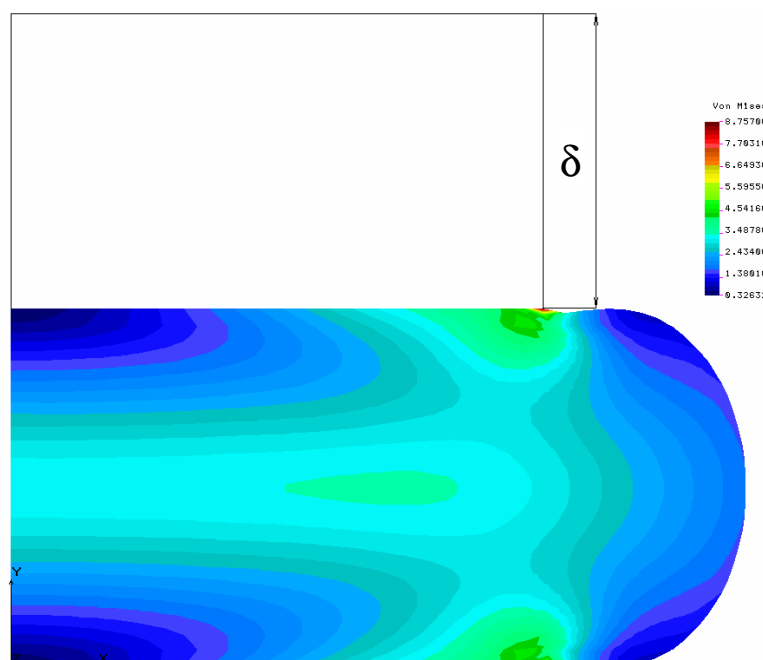
Tab. 66. Výsledky modelování pružiny výšky 20 mm

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h_6	30

Tab. 67. Rozměry modelované pružiny 3

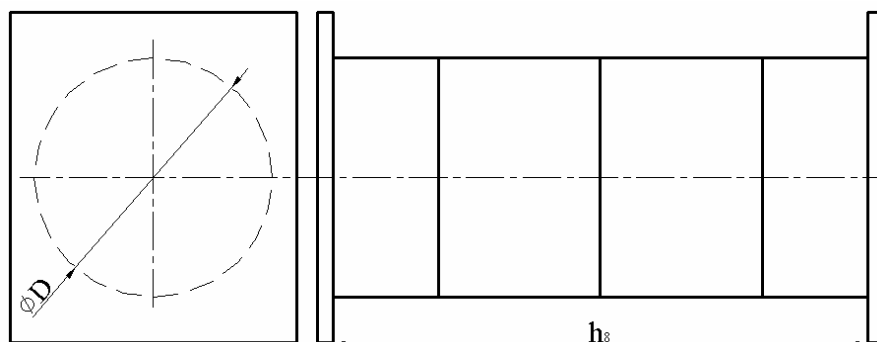


Obr. 76. Napjatost a deformace pružiny výšky 30 mm

Tlaková pružina výšky 30 mm		
Krok	Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,5	2,327
2	1	4,294
3	1,5	5,998
4	2	7,498
5	2,5	8,825
6	3	10
7	3,5	11,05
8	4	11,98
9	4,5	12,81
10	5	13,57

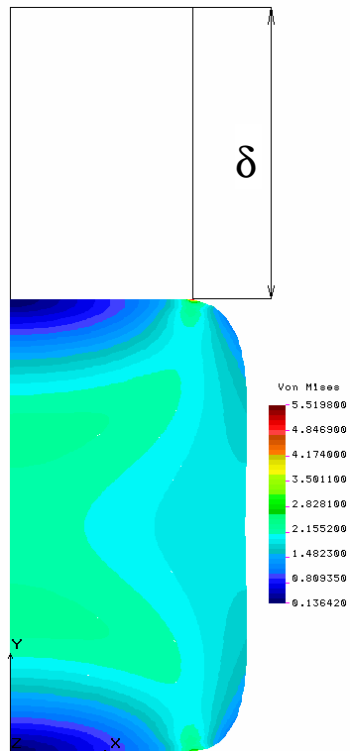
Tab. 68. Výsledky modelování pružiny
výšky 30 mm

Modelovaná pružina



Rozměr	Hodnota[mm]
ϕD	49
Výška h	100

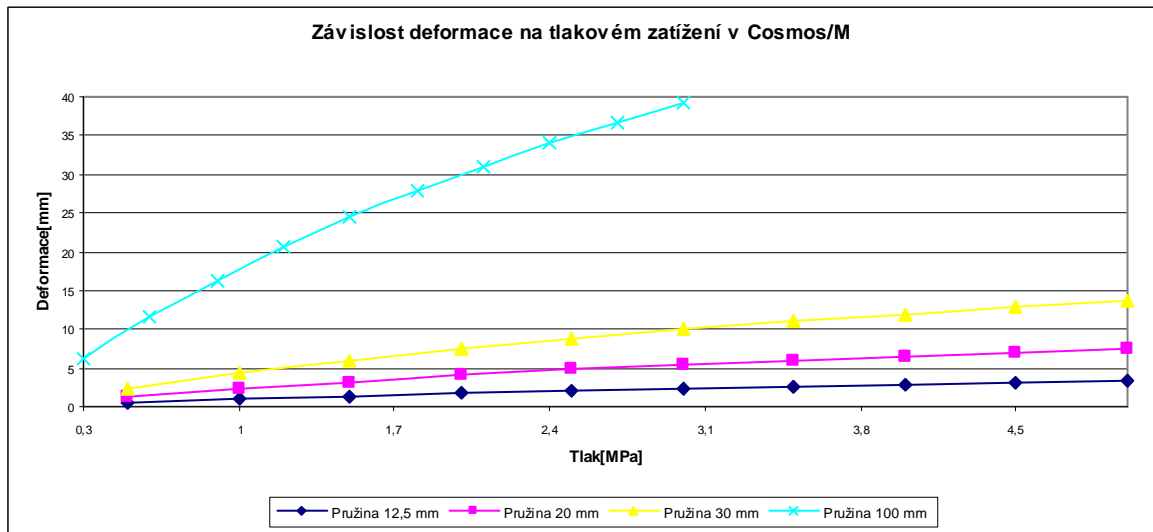
Tab. 69. Rozměry nelineárně modelované pružiny 4



Obr. 77. Napjatost a deformace pružiny výšky 100 mm

Tlaková pružina výšky 100 mm		
Krok	Tlak p [MPa]	Deformace δ [mm]
1	0,3	6,146
2	0,6	11,55
3	0,9	16,34
4	1,2	20,6
5	1,5	24,43
6	1,8	27,9
7	2,1	31,06
8	2,4	33,97
9	2,7	36,65
10	3	39,16

Tab. 70. Výsledky modelování pružiny
výšky 100 mm



Obr. 78. Graf závislosti deformace na tlakovém zatížení jednotlivých výšek pružin při modelování

13.5 Zhodnocení nelineárního modelování

Při modelování byly získány principiálně shodné výsledky napětí v případě grafického vykreslení napjatosti v jednotlivých pružinách, a tedy tyto grafické výsledky lineárního i nelineárního modelování zobrazují skutečnost, že maximální hodnoty napětí jsou situovány v krajních rozích pružin a to v oblastech, kde dochází ke vzájemné vazbě pryž-ocelový plech.

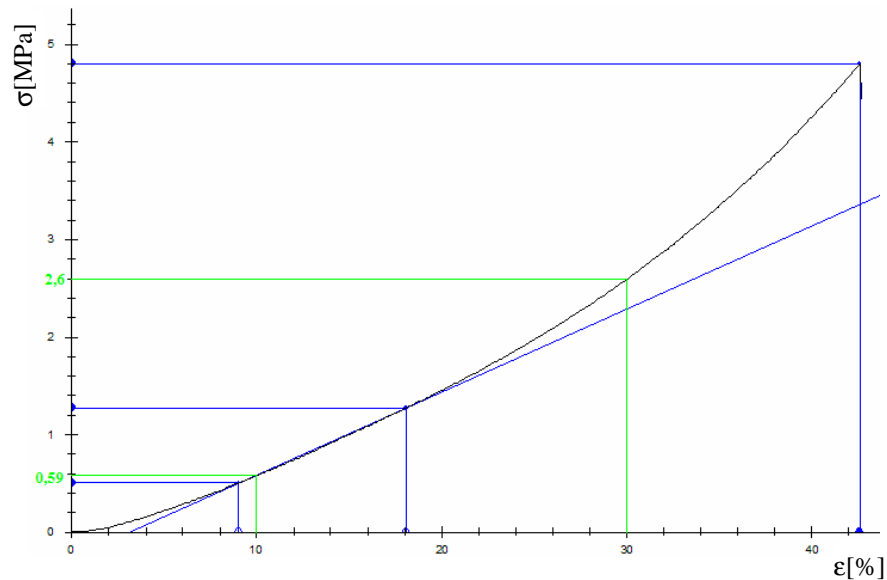
14 SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH, ANALYTICKÝCH A MODELOVÝCH VÝSLEDKŮ

Tato kapitola diplomové práce má za úkol zjistit, jak se liší výsledky experimentu, analytického výpočtu a modelování.

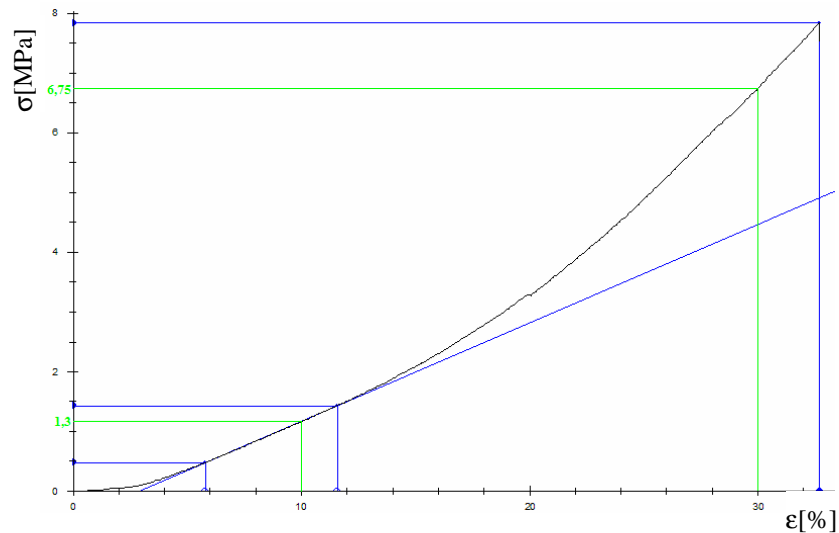
14.1 Porovnání experimentálního řešení s analytickým výpočtem

S pomocí teoretického rozboru mechanického chování tlakových pružin (viz kapitola 7), bude nyní porovnáno experimentální a analytické řešení plných cylindrických tlakových pružin.

Pružina výšky 12,5 mm



Obr. 79. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 12,5 mm



Obr. 80. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky
12,5 mm

Pro srovnání experiment- výpočet jsou použity grafy z experimentální tlakové zkoušky. Srovnání je provedeno pro lineární a nelineární oblast. Cílem je získat tvarovou funkci pro experiment a tvarovou funkci pro výpočet, a tyto hodnoty navzájem porovnat.

Tvarová funkce je:

$$\phi(f) = \frac{F_{\text{vázaná}}}{F_{\text{nevázaná}}} \quad [14] \quad (114)$$

Pro experimentální porovnání byly zvoleny deformace v lineární oblasti 10% a v nelineární 30 % pro pružinu výšky 12,5 mm. Dle těchto poměrných deformací byla odečtena inženýrská napětí, která byla přepočtena na silové účinky, a tak:

$$\sigma = \frac{F}{S} \Rightarrow F = \sigma \cdot S = \sigma \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (115)$$

Příklad srovnání pro lineární oblast pružiny výšky 12,5 mm- experiment

Pro $\epsilon = 10\%$ byla odečtena inženýrská napětí:

$$\sigma_{\text{nevázaná}} = 0,59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{vázaná}} = 1,3 \text{ MPa}$$

Z toho je nyní:

$$F_{\text{nevázaná}} = \sigma_{\text{nevázaná}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,59 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 1112,587 \text{ N} \quad (116)$$

$$F_{\text{vázaná}} = \sigma_{\text{vázaná}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 2451,463 \text{ N} \quad (117)$$

A tvarová funkce je:

$$\phi(f) = \frac{F_{\text{vázaná}}}{F_{\text{nevázaná}}} = \frac{2451,463}{1112,587} = 2,203$$

Příklad srovnání pro lineární oblast pružiny výšky 12,5 mm- analytický výpočet

Zprvu je nutné získat sílu F_0 , což je síla zatěžující nevázanou tlakovou pružinu, hodnoty R , E a δ budou použity z experimentálního řešení, což bude platit i pro ostatní rozměry pružin:

$$R = 24,5 \text{ mm}$$

$$E = 4,22 \text{ MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)}$$

$$\varepsilon_{\text{nevázaná}} = 10\%$$

$$\varepsilon_{\text{vázaná}} = 10\%$$

Z ε je pro analytický výpočet nutná znalost δ , a tak:

$$\varepsilon_{\text{nevázaná}} = \frac{\delta_{\text{nevázaná}}}{h} \Rightarrow \delta_{\text{nevázaná}} = \varepsilon_{\text{nevázaná}} \cdot h = 0,1 \cdot 12,5 = 1,25 \text{ mm} \quad (118)$$

Protože předpokladem správného srovnání je, aby $\varepsilon_{\text{nevázaná}} = \varepsilon_{\text{vázaná}}$, tak platí že pružina vázaná i nevázaná mají stejnou výšku, takže $\delta_{\text{nevázaná}} = \delta_{\text{vázaná}} = \delta$.

$$F_o = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot R^2}{h} = \frac{\pi \cdot 4,22 \cdot 1,25 \cdot 24,5^2}{12,5} = 795,783 \text{ N} \quad (119)$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot R^4}{2 \cdot h^3} = \frac{\pi \cdot 4,22 \cdot 1,25 \cdot 24,5^4}{2 \cdot 12,5^3} = 1528,539 \text{ N} \quad (120)$$

Celková síla pro stlačení pryžokovového prvku je:

$$F = F_o + F_p = 795,783 + 1528,539 = 2324,322 \text{ N} \quad (121)$$

Tvarová funkce je :

$$\phi(f) = \frac{F}{F_0} = \frac{2324,322}{795,783} = 2,921 \tag{122}$$

Výpočet této tvarové funkce je co se týče výsledné hodnoty identická, jako při výpočtu v kapitole 12.

Výše popsaný princip výpočtu a srovnání je identický i pro nelineární oblast, a tak budou uvedeny pouze tabulky s vypočtenými hodnotami a grafy, pro odečtení potřebných hodnot pro porovnání.

Identický princip srovnání je i pro ostatní pružiny.

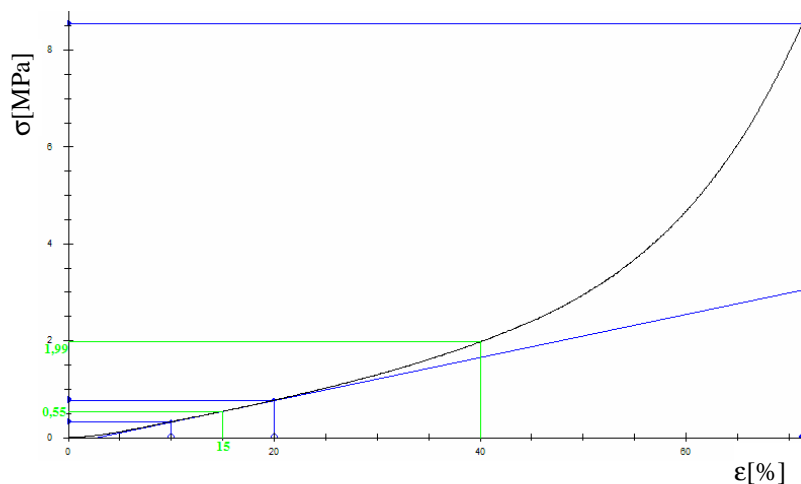
Pružina výšky 12,5 mm								
		S[mm ²]	σ[MPa]	F[N]	ε[%]	δ[mm]	ϕ _{experiment} (f)	ϕ _{výpočet} (f)
Lineární oblast	Nevázaná	1885,741	0,59	1112,587	10	1,25	2,203	2,921
	Vázaná	1885,741	1,3	2451,463	10	1,25		
Nelineární oblast	Nevázaná	1885,741	2,6	4902,927	30	3,75	2,596	2,921
	Vázaná	1885,741	6,75	12728,752	30	3,75		

Tab. 71. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 12,5 mm

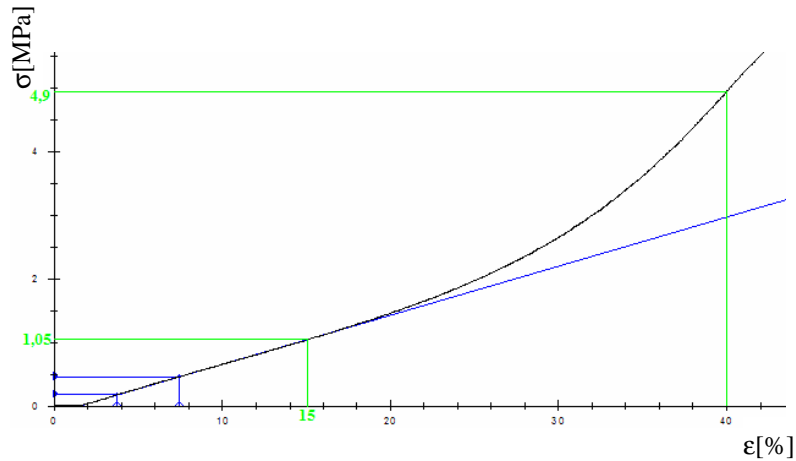
Pružina výšky 20 mm

R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)



Obr. 81. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 20 mm



Obr. 82. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 20 mm

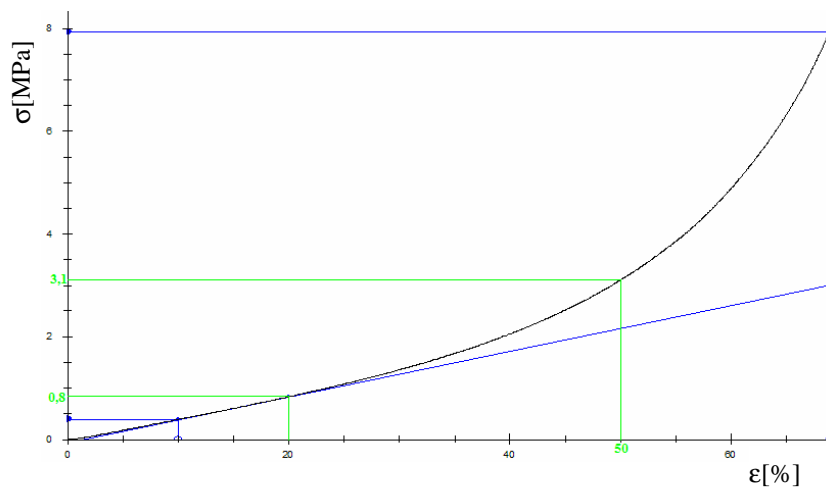
Pružina výšky 20 mm								
		S[mm ²]	σ[MPa]	F[N]	ε[%]	δ[mm]	φ _{experiment} (f)	φ _{vypočet} (f)
Lineární oblast	Nevázaná	1885,741	0,55	1037,158	15	3	1,909	1,750
	Vázaná	1885,741	1,05	1980,028	15	3		
Nelineární oblast	Nevázaná	1885,741	1,99	3752,625	40	8	2,462	1,750
	Vázaná	1885,741	4,90	9240,131	40	8		

Tab. 72. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 20 mm

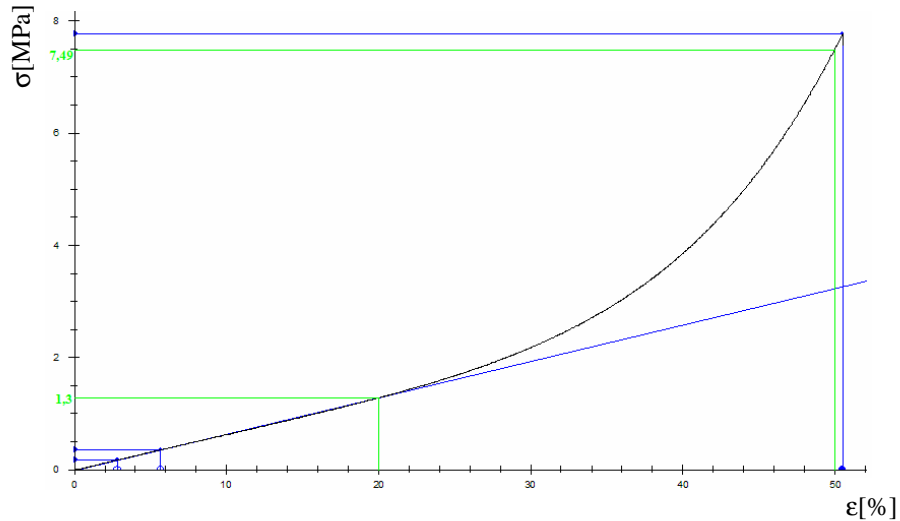
Pružina výšky 30 mm

R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)



Obr. 83. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 30 mm



Obr. 84. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 30 mm

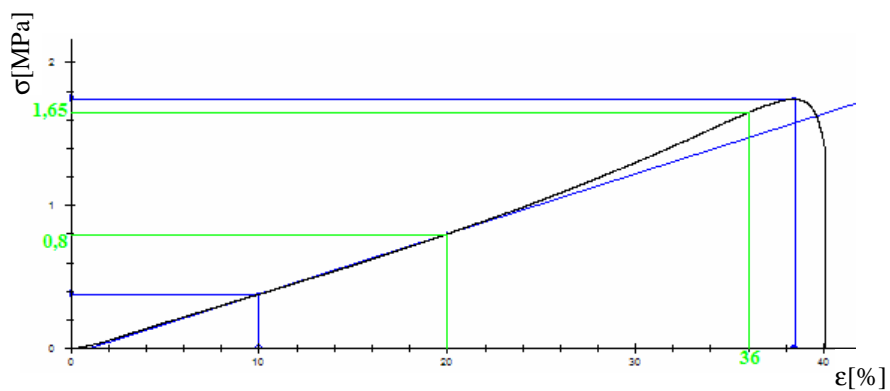
Pružina výšky 30 mm								
		S[mm ²]	σ[MPa]	F[N]	ε[%]	δ[mm]	φ _{experiment(f)}	φ _{vypočet(f)}
Lineární oblast	Nevázaná	1885,741	0,80	1508,593	20	6	1,625	1,333
	Vázaná	1885,741	1,30	2451,463	20	6		
Nelineární oblast	Nevázaná	1885,741	3,10	5845,797	50	15	2,416	1,333
	Vázaná	1885,741	7,49	14124,200	50	15		

Tab. 73. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 30 mm

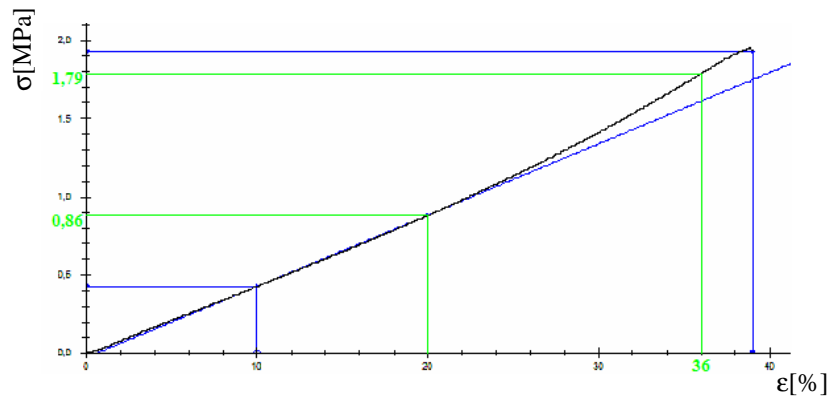
Pružina výšky 100 mm

R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)



Obr. 85. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 100 mm



Obr. 86. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny
výšky 100 mm

Pružina výšky 100 mm								
		S[mm ²]	σ[MPa]	F[N]	ε[%]	δ[mm]	φ _{experiment(f)}	φ _{vypočet(f)}
Lineární oblast	Nevázaná	1885,741	0,80	1508,593	20	20	1,075	1,030
	Vázaná	1885,741	0,86	1621,737	20	20		
Nelineární oblast	Nevázaná	1885,741	1,65	3111,473	36	36	1,085	1,030
	Vázaná	1885,741	1,79	3375,476	36	36		

Tab. 74. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 100 mm

14.2 Porovnání výsledků experimentu a modelového řešení – lineární FEM

Nyní budou porovnány výsledky lineárního modelového řešení s experimentem.

Pružina výšky 12,5 mm

R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

p= 1,5 a 3 MPa(plošný tlak na pružinu- model)

V kapitole 13.1 byly modelovány pružiny pomocí lineární analýzy, a konkrétně pro pružinu výšky 12,5 mm byla zjištěna, po zatížení plošným tlakem 1,5 MPa, deformace $\delta = 1,625$ mm a pro zatížení tlakem 3 MPa je $\delta = 3,251$. Zatížení dvěma hodnotami tlaku v tomto případě bylo proto, aby bylo možné odečíst z grafu experimentu malé a velké deformace. Pro porovnání je tedy nutné tyto deformace také odečíst z grafů(pro vázanou i nevázanou pružinu) z experimentu pro tuto pružinu, a opět řešit tvarové funkce, které budou následně porovnány.

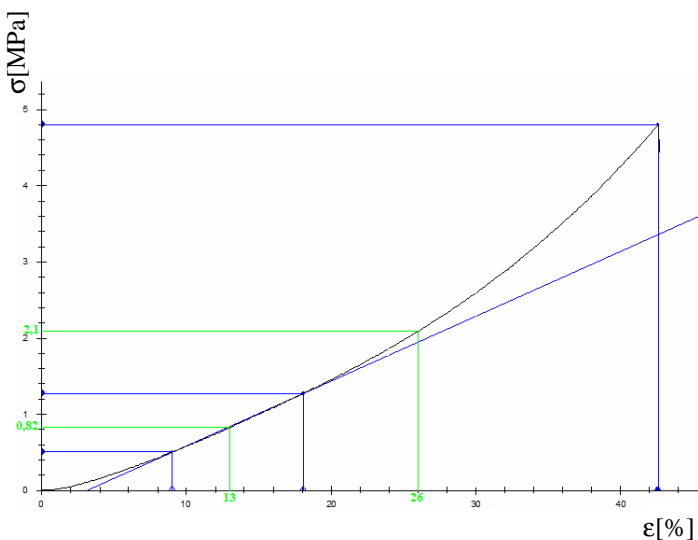
Příklad řešení pro malé deformace

$$\delta_{\text{experiment}} = 1,625 \text{ mm}$$

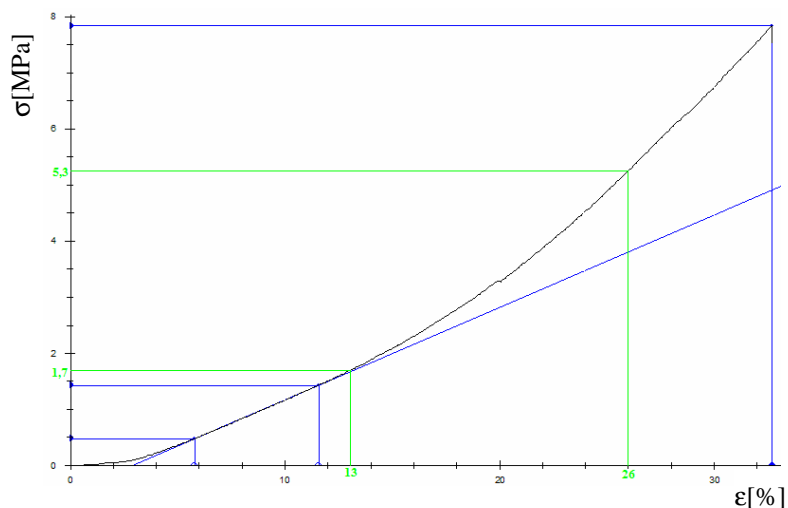
$$\delta_{\text{model}} = 1,625 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{\text{experiment}} = \frac{\delta_{\text{experiment}}}{h} \cdot 100 = \frac{1,625}{12,5} \cdot 100 = 13\% \quad (123)$$

$$\varepsilon_{\text{experiment}} = \varepsilon_{\text{model}} = \varepsilon$$



Obr. 87. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 12,5 mm



Obr. 88. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 12,5 mm

I v tomto případě bylo z experimentu pro danou deformaci odečteno inženýrské napětí, ze kterého budou vyjádřeny síly pro vázanou i nevázanou pružinu, a následně tvarová funkce:

$$F_{\text{nevázaná}} = \sigma_{\text{nevázaná}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,82 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 1546,308 \text{ N} \quad (124)$$

$$F_{\text{vázaná}} = \sigma_{\text{vázaná}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1,7 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 3205,76 \text{ N} \quad (125)$$

A tvarová funkce je:

$$\phi_{\text{experiment}}(f) = \frac{F_{\text{vázaná}}}{F_{\text{nevázaná}}} = \frac{3205,76}{1546,308} = 2,073 \quad (126)$$

Model:

Opět je pro získání tvarové funkce nutná znalost síly působící na vázanou pružinu a nevázanou pružinu. Nevázaná pružina nebyla namodelována, a tak vyjádření síly působící na nevázanou pružinu je nutné provést pomocí lineární elasticity a Hookeova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\frac{F_{\text{nevázaná}}}{S} = E \cdot \varepsilon \Rightarrow F_{\text{nevázaná}} = E \cdot \frac{\delta}{h} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 4,22 \cdot \frac{1,625}{12,5} \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 1034,518 \text{ N} \quad (127)$$

$$F_{\text{vázaná}} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 2828,611 \text{ N} \quad (128)$$

A tvarová funkce je:

$$\phi_{\text{model}}(f) = \frac{F_{\text{vázaná}}}{F_{\text{nevázaná}}} = \frac{2828,611}{1034,518} = 2,734 \quad (129)$$

Pružina výšky 12,5 mm							
Malé deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,5	1,625	13	1034,518	2,734
Vázaná	1,625	13		2828,611			
Malé deformace	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,82	1,625	13	1546,308	2,073
Vázaná	1,7	1,625	13	3205,76			
Velké deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	3	3,251	26	2069,672	2,733
	Vázaná	3,251		26	5657,223		
	Velké deformace	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]
Nevázaná			2,1	3,251	26	3960,056	2,524
Vázaná	5,3	3,251	26	9994,427			

Tab. 75. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 12,5 mm

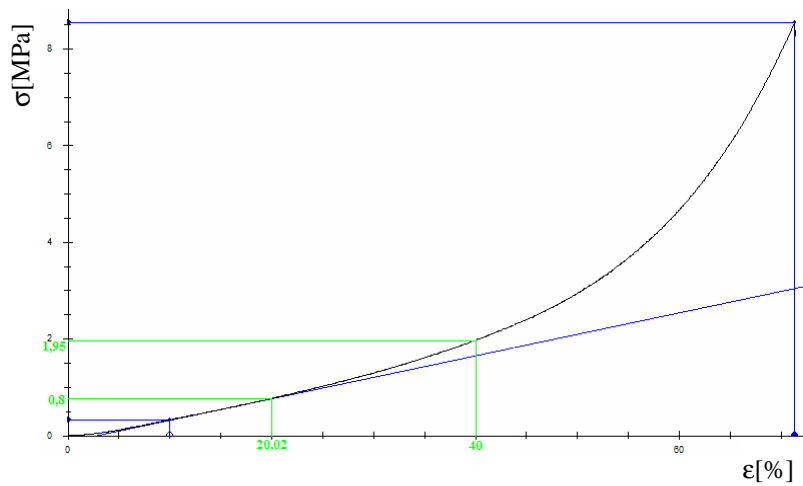
Identický postup je i u porovnání při velkých deformacích a u pružin ostatních, a tak budou uvedeny pouze grafy a hodnoty v tabulkách korespondující s výše popsaným postupem.

Pružina výšky 20 mm

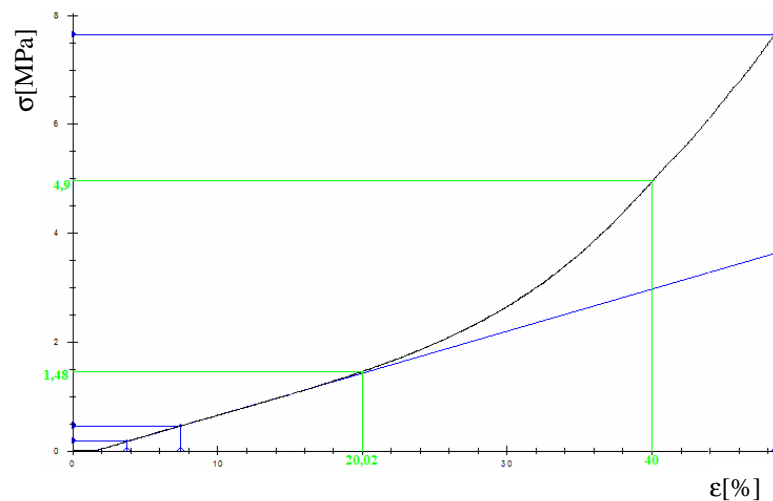
$R = 24,5 \text{ mm}$

$E = 4,22 \text{ MPa}$ (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

$p = 1,5 \text{ a } 3 \text{ MPa}$



Obr. 89. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 20 mm



Obr. 90. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 20 mm

Pružina výšky 20 mm								
Malé deformace	Model		p [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$	
		Nevázaná	1,5	4,004	20,02	1593,157	1,775	
		Vázaná		4,004	20,02	2828,611		
Experiment			σ [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$	
		Nevázaná	0,8	4,004	20,02	1508,593	1,850	
		Vázaná	1,48	4,004	20,02	2790,897		
Velké deformace	Model		p [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$	
		Nevázaná	3	8,007	40	3185,916	1,776	
		Vázaná		8,007	40	5657,223		
	Experiment			σ [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$
			Nevázaná	1,95	8,007	40	3677,195	2,513
Vázaná	4,9	8,007	40	9240,131				

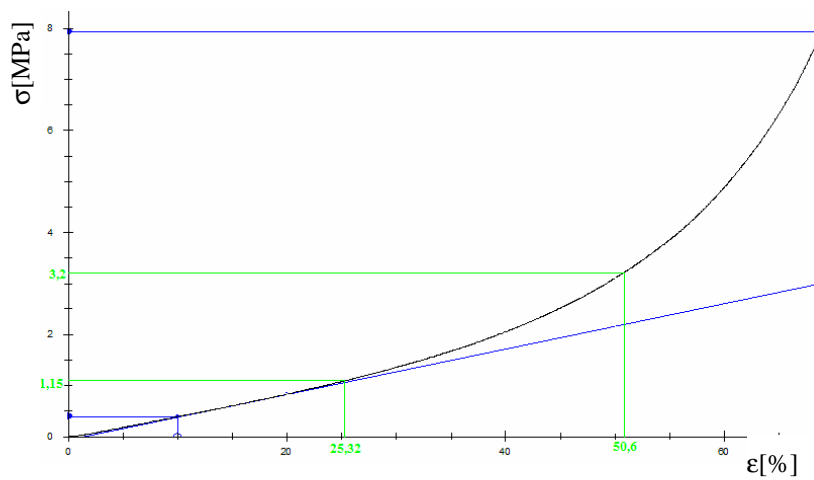
Tab. 76. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 20 mm

Pružina výšky 30 mm

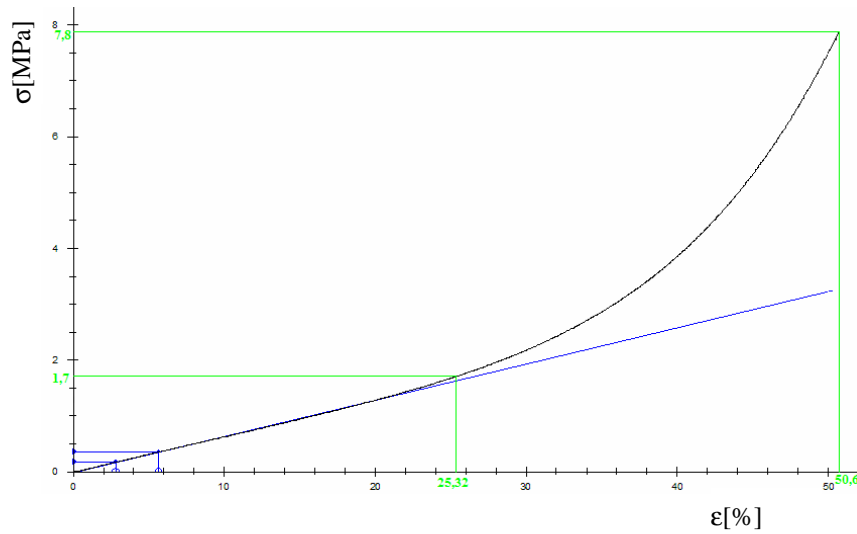
R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

p= 1,5 MPa a 3 MPa



Obr. 91. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 30 mm



Obr. 92. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 30 mm

Pružina výšky 30 mm							
Malé deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,5	7,595	25,32	2014,657	1,404
		Vázaná		7,595	25,32	2828,611	
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,15	7,595	25,32	2168,602	1,478
		Vázaná	1,7	7,595	25,32	3205,76	
Velké deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	3	15,19	50,6	4029,313	1,404
		Vázaná		15,19	50,6	5657,223	
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	3,2	15,19	50,6	6034,371	2,438
		Vázaná	7,8	15,19	50,6	14708,78	

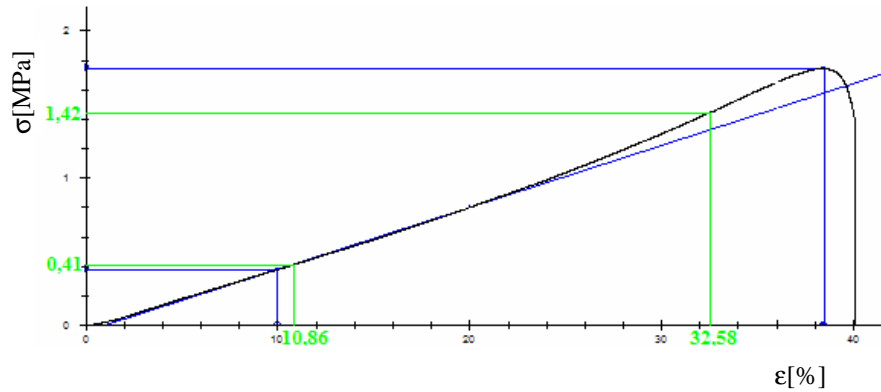
Tab. 77. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 30 mm

Pružina výšky 100 mm

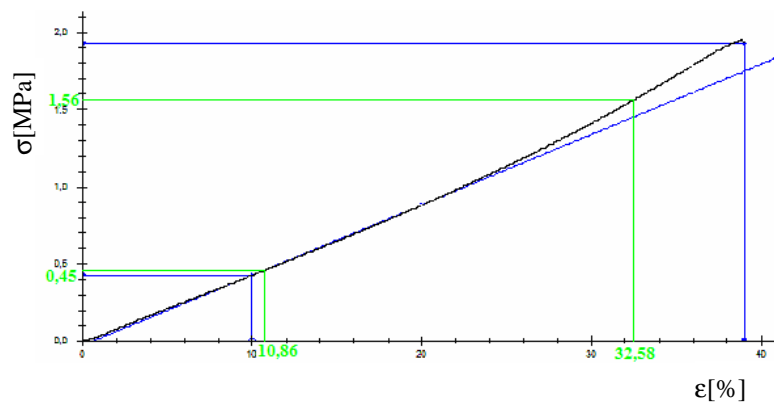
R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

p= 0,5 a 1,5 MPa



Obr. 93. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 100 mm



Obr. 94. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 100 mm

Pružina výšky 100 mm							
Malé deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,5	10,86	10,86	864,22	1,091
		Vázaná		10,86	10,86	942,8705	
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,41	10,86	10,86	773,1538	1,098
		Vázaná	0,45	10,86	10,86	848,5834	
Velké deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,5	32,58	32,58	2592,66	1,091
		Vázaná		32,58	32,58	2828,611	
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,42	32,58	32,58	2677,752	1,099
		Vázaná	1,56	32,58	32,58	2941,756	

Tab. 78. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 100 mm

14.3 Porovnání výsledků experimentu a modelového řešení – nelineární Neohookeovský FEM

Dle identického postupu budou porovnány výsledky experimentu a nelineárního FEM modelování, jelikož bylo nelineární modelování realizováno dvěma způsoby, pro porovnání bylo zvoleno Neohookeovské nelineární modelování.

V případě Neohookeovského modelování byly pružiny zatíženy maximálním tlakem 5 MPa, s výjimkou pružiny výšky 100 mm, ta byla zatížena tlakem 3 MPa.

Srovnání bude realizováno tak, že vždy budou vybrány dvě hodnoty deformace z nichž jedna bude nižší a druhá vyšší, a opět budou porovnány tvarové funkce v oblasti malých a velkých deformací.

Pružina výšky 12,5 mm

$$R = 24,5 \text{ mm}$$

$$E = 4,22 \text{ MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)}$$

$$p = 5 \text{ MPa (plošný tlak na pružinu- model)}$$

Příklad řešení pro malé deformace

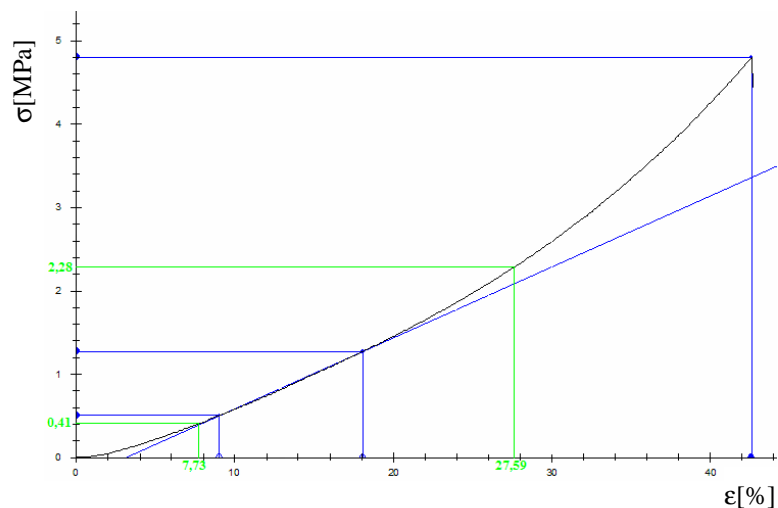
$$\delta_{\text{experiment}} = 0,966 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{model}} = 0,966 \text{ mm}$$

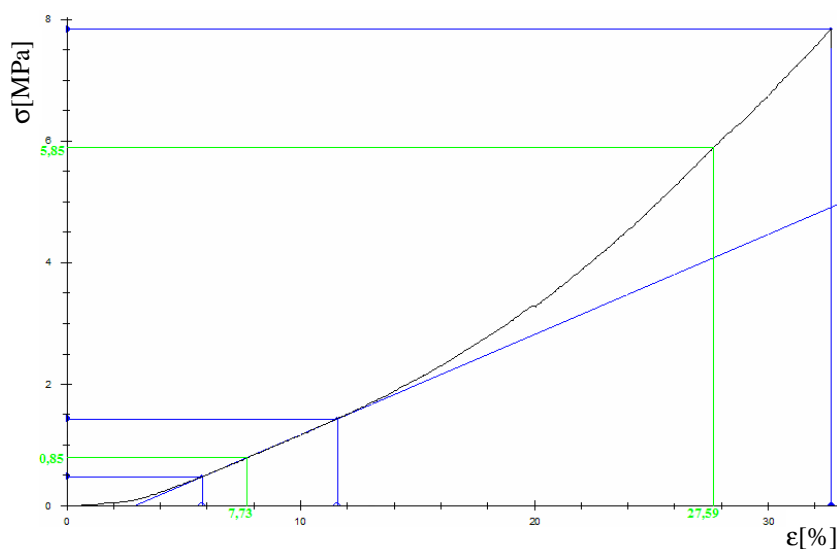
Z modelového řešení byly zvoleny malé deformace pro model, pro porovnání je nutné, aby identická deformace byla platná i pro graf experimentu, odkud bude odečteno dle poměrné deformace inženýrské napětí a vypočtena zatěžující síla.

$$\varepsilon_{\text{experiment}} = \frac{\delta_{\text{experiment}}}{h} \cdot 100 = \frac{0,966}{12,5} \cdot 100 = 7,73\% \quad (130)$$

$$\varepsilon_{\text{experiment}} = \varepsilon_{\text{model}} = \varepsilon$$



Obr. 95. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 12,5 mm



Obr. 96. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 12,5 mm

I v tomto případě bylo z experimentu pro danou deformaci odečteno inženýrské napětí, ze kterého budou vyjádřeny síly pro vázanou i nevázanou pružinu, a následně tvarová funkce:

$$F_{\text{nevázaná}} = \sigma_{\text{nevázaná}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,41 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 773,154 \text{ N} \quad (131)$$

$$F_{\text{vázaná}} = \sigma_{\text{vázaná}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,85 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 1602,88 \text{ N} \quad (132)$$

A tvarová funkce je:

$$\phi_{\text{experiment}}(f) = \frac{F_{\text{vázaná}}}{F_{\text{nevázaná}}} = \frac{1602,88}{773,154} = 2,073 \quad (133)$$

Model:

Opět je pro získání tvarové funkce nutná znalost síly působící na vázanou pružinu a nevázanou pružinu. Nevázaná pružina nebyla namodelována, a tak vyjádření síly působící na nevázanou pružinu je nutné provést pomocí lineární elasticity a Hookeova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\frac{F_{\text{nevázaná}}}{S} = E \cdot \varepsilon \Rightarrow F_{\text{nevázaná}} = E \cdot \frac{\delta}{h} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 4,22 \cdot \frac{0,966}{12,5} \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 614,98 \text{ N} \quad (134)$$

$$F_{\text{vázaná}} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1 \cdot \frac{\pi \cdot 49^2}{4} = 1885,741 \text{ N} \quad (135)$$

A tvarová funkce je:

$$\phi_{\text{model}}(f) = \frac{F_{\text{vázaná}}}{F_{\text{nevázaná}}} = \frac{1885,741}{614,98} = 3,066 \quad (136)$$

Pružina výšky 12,5 mm							
Malé deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1	0,966	7,73	614,9809	3,066
Vázaná	0,966	7,73		1885,741			
Malé deformace	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,41	0,966	7,73	773,1538	2,073
Vázaná	0,85	0,966	7,73	1602,88			
Velké deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	5	3,449	27,59	2195,724	4,294
Vázaná	3,449	27,59		9428,705			
Velké deformace	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	2,28	3,449	27,59	4299,489	2,566
Vázaná	5,85	3,449	27,59	11031,58			

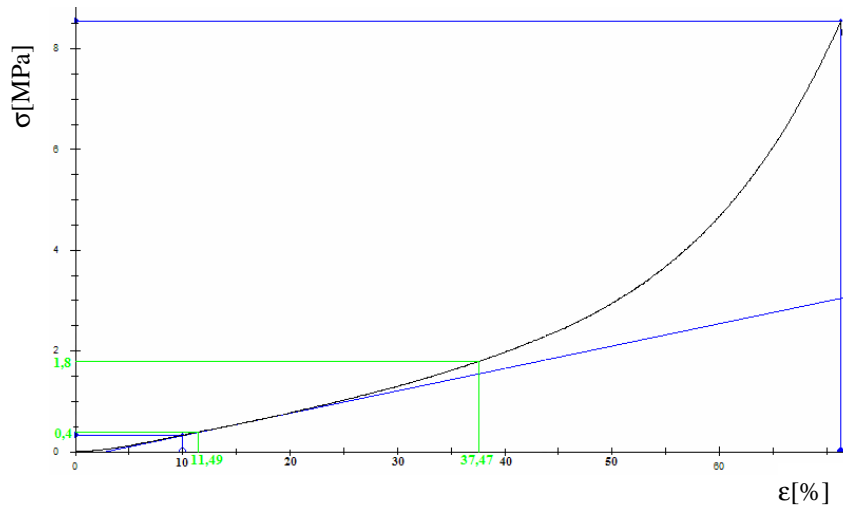
Tab. 79. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 12,5 mm

Pružina výšky 20 mm

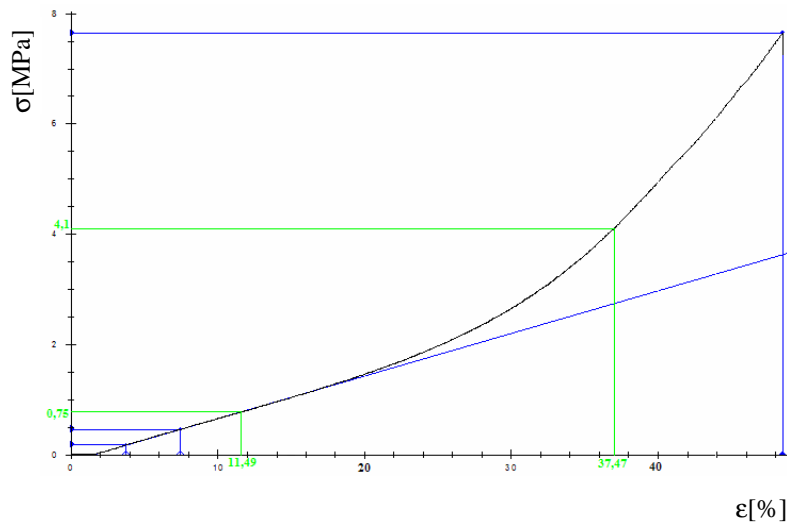
R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

p= 5 MPa(plošný tlak na pružinu- model)



Obr. 97. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 20 mm



Obr. 98. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 20 mm

Pružina výšky 20 mm							
Malé deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1	2,297	11,49	913,9564	2,063
	Vázaná	2,297		11,49	1885,741		
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,4	2,297	11,49	754,2964	1,875
	Vázaná	0,75	2,297	11,49	1414,306		
Velké deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	5	7,494	37,47	2981,798	3,162
	Vázaná	7,494		37,47	9428,705		
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,8	7,494	37,47	3394,334	2,278
	Vázaná	4,1	7,494	37,47	7731,538		

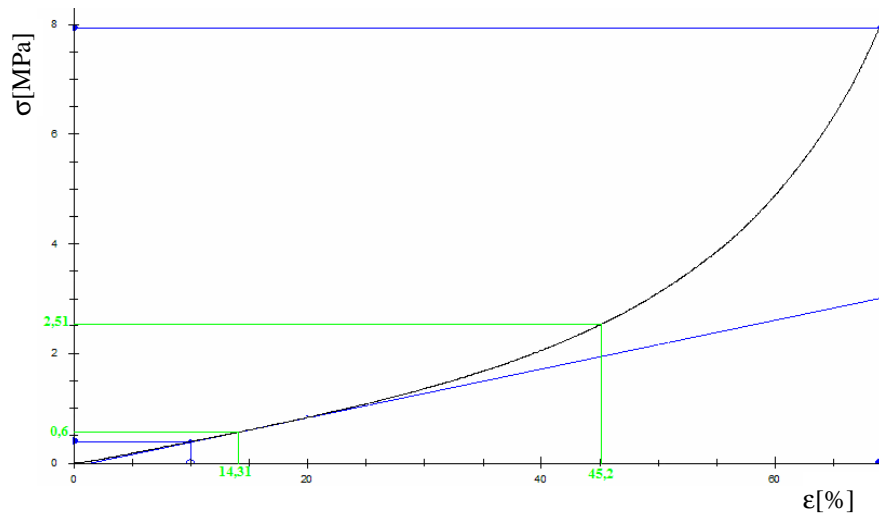
Tab. 80. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 20 mm

Pružina výšky 30 mm

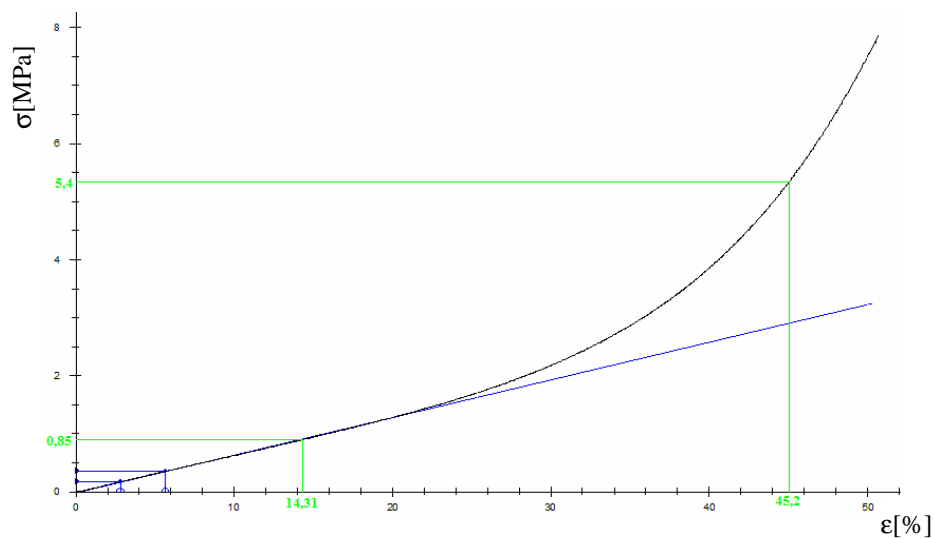
$R = 24,5 \text{ mm}$

$E = 4,22 \text{ MPa}$ (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

$p = 5 \text{ MPa}$ (plošný tlak na pružinu- model)



Obr. 99. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny
výšky 30 mm



Obr. 100. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny
výšky 30 mm

Pružina výšky 30 mm							
Malé deformace	Model		p [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$
		Nevázaná	1	4,294	14,31	1139,03	1,656
		Vázaná		4,294	14,31	1885,741	
Velké deformace	Experiment		σ [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$
		Nevázaná	0,6	4,294	14,31	1131,445	1,417
		Vázaná	0,85	4,294	14,31	1602,88	
Velké deformace	Model		p [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$
		Nevázaná	5	13,57	45,2	3599,59	2,619
		Vázaná		13,57	45,2	9428,705	
Velké deformace	Experiment		σ [MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F [N]	$\phi(f)$
		Nevázaná	2,51	13,57	45,2	4733,21	2,151
		Vázaná	5,4	13,57	45,2	10183	

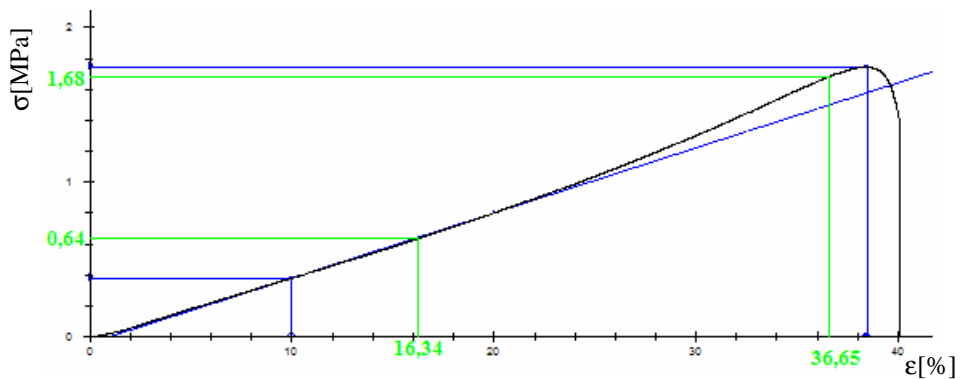
Tab. 81. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 30 mm

Pružina výšky 100 mm

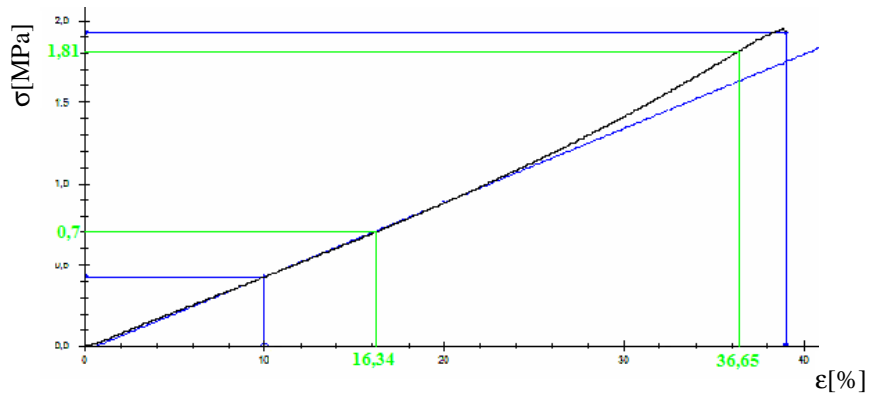
R= 24,5 mm

E= 4,22 MPa (získáno z nevázané pružiny výšky 100 mm)

p= 3 MPa(plošný tlak na pružinu- model)



Obr. 101. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 100 mm



Obr. 102. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny
výšky 100 mm

Pružina výšky 100 mm							
Malé deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,9	16,34	16,34	1300,309	1,305
	Vázaná	16,34		16,34	1697,167		
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	0,64	16,34	16,34	1206,874	1,094
Vázaná	0,7	16,34	16,34	1320,019			
Velké deformace	Model		p[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	2,7	36,65	36,65	2916,544	1,746
	Vázaná	36,65		36,65	5091,501		
	Experiment		σ[MPa]	δ[mm]	ε[%]	F[N]	φ(f)
		Nevázaná	1,68	36,65	36,65	3168,045	1,077
Vázaná	1,81	36,65	36,65	3413,191			

Tab. 82. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 100 mm

14.4 Porovnání nelineární FEM a nelineární Neohookeovský FEM

Protože nelineární modelování bylo realizováno dvěma různými způsoby, tak budou zde srovnány výsledky nelineárního a Neohookeovského FEM modelování. Toto srovnání se bude týkat velkých deformací. Jednotlivé výsledky budou porovnány v tabulkách, protože postup je identický jako ve výše popsáných případech.

Pružina výšky 12,5 mm

Pružina výšky 12,5 mm						
		p[MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F[N]	ϕ (f)
Nelineární model	Nevázaná	2,2	2,4	19,2	1527,903	2,715
	Vázaná		2,4	19,2	4148,630	
Neohookeovský model	Nevázaná	3	2,4	19,2	1527,903	3,703
	Vázaná		2,4	19,2	5657,223	

Tab. 83. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky
12,5 mm

Pružina výšky 20 mm

Pružina výšky 20 mm						
		p[MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F[N]	ϕ (f)
Nelineární model	Nevázaná	2,2	5,4	27	2148,613	1,931
	Vázaná		5,4	27	4148,630	
Neohookeovský model	Nevázaná	3	5,4	27	2148,613	2,633
	Vázaná		5,4	27	5657,223	

Tab. 84. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky
20 mm

Pružina výšky 30 mm

Pružina výšky 30 mm						
		p[MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F[N]	ϕ (f)
Nelineární model	Nevázaná	1,75	8,8	29,33	2334,296	1,414
	Vázaná		8,8	29,33	3300,047	
Neohookeovský model	Nevázaná	2,5	8,8	29,33	2334,296	2,020
	Vázaná		8,8	29,33	4714,352	

Tab. 85. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky
30 mm

Pružina výšky 100 mm

Pružina výšky 100 mm						
		p[MPa]	δ [mm]	ϵ [%]	F[N]	ϕ (f)
Nelineární model	Nevázaná	2,25	39,2	39,2	3119,468	1,360
	Vázaná		39,2	39,2	4242,917	
Neohookeovský model	Nevázaná	3	39,2	39,2	3119,468	1,814
	Vázaná		39,2	39,2	5657,223	

Tab. 86. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky
100 mm

14.5 Závěr srovnání experimentálního, analytického a modelového studia tlakových elastomerních pružin

Byly navzájem porovnány výsledky řešení experimentálního a analytického, experimentálního a modelového, a modelového nelineárního a modelového Neohookeovského řešení.

Při srovnání experimentu a výpočtu (analytického řešení), byl kladen důraz na tvarovou funkci. Porovnání bylo realizováno v oblasti lineární elasticity, kde byly odchylky mezi výpočtem a reálným experimentem nižší, zatímco při srovnání v oblasti nelineární, a tedy v oblasti velkých deformací jsou tyto odchylky diametrální. Bylo zpozorováno, že pouze v případě pružiny o nejnižší výšce, a tedy pružiny 12,5 mm vysoké, byla odchylka ve tvarové funkci experiment- výpočet vyšší v oblasti lineární a nižší v nelineární oblasti. U ostatních pružin byl zaznamenán výsledek opačný, a tedy nižší rozdíl ve tvarové funkci v oblasti lineární a vyšší rozdíl v oblasti velkých deformací. Z pohledu analytického výpočtu je nutno podotknout, že ten se uplatňuje pouze při uvažování lineární elasticity, a tedy malých deformací. Rozdíly mohou být také zapříčiněny samotným experimentem, kdy při experimentu předpokládáme vznik různých chyb měření, a tedy: již od výroby zkušebních těles, kdy styčné plochy nemusely být ideálně rovné, při měření došlo ke tření, spojení pryže a kovu nemuselo být co se týče silového působení ideální a dále také chyba pozorovatele při měření, a dále samozřejmě chyby způsobené nepřesností odečtu hodnot inženýrských (smluvních) napětí z grafu experimentálních tlakových zkoušek.

Dále bylo provedeno porovnání, co se týče experimentu a modelového studia pružin. Z pohledu modelování byly s experimentem porovnávány dva způsoby FEM modelů pružin, což znamená lineární a nelineární Neohookeovský. Opět je možné z výsledků pozorovat odchylky. V případě lineárních modelů jsou hodnoty tvarových funkcí bližší výpočtu, než hodnoty tvarových funkcí získaných experimentem, což je způsobeno silnou závislostí na FEM na lineární elasticitě v případě malých deformací. V případě velkých deformací jsou rozdíly mezi lineárními modely, které se stále řídí Hookeovým zákonem, a experimentem, markantní. Pouze v případě pružiny o hodnotě výšky 100 mm jsou rozdíly v tvarové funkci mezi modelem a experimentem minimální, ale to je způsobeno stlačením pružiny při experimentu na poměrnou deformaci do 40%.

Výsledky v případě Neohookeovských modelů jsou takové, že tuhosti pružin modelovaných jsou vyšší než v případě pružin měřených. V případě malých deformací jsou odchylky tvarových funkcí nižší, v případě deformací velkých jsou opět odchylky vyšší.

Při porovnání nelineárních a Neohookeovských modelů je největší odchylka tvarové funkce v případě pružiny výšky 12,5 mm, v případě ostatních pružin se odchylka porovnávaných tvarových funkcí pohybuje okolo hodnoty 0,6. Modely Neohookeovské jsou, co se týče hodnoty zvýšení tuhosti, tužší než modely nelineární.

Souhrnně lze tedy říci, že pokud bude daná pružina v praxi používána v oblasti malých deformací, tak při její konstrukci lze využít výpočtů lineární elasticity, spolu s lineárním FEM modelováním, které má v současné době na poli konstrukce nezastupitelnou úlohu.

Pokud by ale na druhé straně byla pružina používána v podmínkách extrémního zatížení a velkých deformací, je nutné přihlédnout k nelineárnímu chování materiálu, a tedy pryže jako takové, použít nelineární FEM, a také zkoušet a dimenzovat na praktické zatěžování pomocí experimentu.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat vliv tvarové funkce na mechanické vlastnosti elastomerních výrobků, konkrétně pryžových pružin, čehož bylo realizováno třemi způsoby: experimentem, analytickým výpočtem a modelováním.

Teoretická část práce se skládá z popisů materiálů používaných v gumárenských technologiích, a tedy byly popsány jednotlivé druhy kaučuků a ostatních složek, které tvoří nezbytné části kaučukových směsí.

Další částí byla příprava kaučukové směsi, především způsob přípravy a předpřípravy základní složky kaučukové směsi, kaučuku.

V následujících kapitolách teoretické části práce byly popsány zkoušky zpracovatelnosti a zkoušky hodnocení mechanických vlastností jak kaučukových směsí, tak konečných výrobků, a tedy vulkanizátů.

V poslední, ale velmi důležité kapitole teoretické části, byla věnována pozornost dimenzování a navrhování pryžokovových pružných prvků, z nichž jeden tvoří zkoumání a výsledky praktické části práce a jedná se o tlakovou pružinu.

Praktická část práce se zabývá samotnou tvarovou funkcí, resp. tvarovým faktorem a jejich vlivem na mechanické vlastnosti a chování tlakových cylindrických pryžokovových pružných prvků. Popis je věnován samotné výrobě zkušebních těles, realizací tlakové zkoušky v laboratoři UVI vázaných a nevázaných pružných prvků, vyhodnocením charakteristik tlakové zkoušky.

Dále byl v části analytické odvozen vztah pro výpočet tvarové funkce resp. tvarového faktoru cylindrické pružiny s kruhovým otvorem a vypočteny tvarové funkce a tvarové faktory pro experimentálně měřená tělesa.

Další částí byla realizace modelových studií prostřednictvím programu Cosmos/M, která se skládá ze tří částí a to části lineární, která není ve vztahu k funkci a nasazení pryžokovových prvků příliš přesná, části nelineární, která bere v potaz hyperelastické vlastnosti materiálu, a části nelineární Neohookeovské.

V poslední kapitole došlo ke srovnání naměřených a modelovaných hodnot.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TOMIS F. *Základy gumárenské a plastikářské technologie*. Brno: VUT, 1980. ISBN 55- 599-80.
- [2] FRANTA, I. *Gumárenská technologie II : Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže*. 2. rozš. vyd. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1969. 537 s. ISBN 04-626-69.
- [3] FRANTA, I. *Gumárenské suroviny*. 3. přeprac. vyd. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1979. 608 s. ISBN 04-618-79.
- [4] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2.vyd. Praha : Vydavatelství VŠCHT, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [5] ŠPAČEK, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II*. Brno: VUT, 1986. 200 s. ISBN 414 – 33759.
- [6] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. VŠCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [7] JANČÍK, M. *Zkoušení hyperelastických materiálů*. Zlín: UTB, 2005. Technologická fakulta, bakalářská práce. 42 s.
- [8] BROWN, R. *Physical Testing of Rubber*. New York: Springer, 2006. 387 s. ISBN 0387282866.
- [9] DVOŘÁK, Z., JAVOŘÍK, J. *Konstrukce výrobků, konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu*. Zlín: UTB, 2009, Technologická fakulta, elektronická podpora. 146 s.
<http://www.ft.utb.cz/czech/uvi/czech/staff/dvorak/elektronickepodpory/pdf/T9KSV_konstrukni_materialy_elastomerni.pdf>
- [10] WILCZINSKY, O. *Nauka o materiálu 2*. Zlín: UTB, 2008. Technologická fakulta, zápisky z přednášek.
- [11] WILCZINSKY, O. *Konstrukční polymery 3*. Zlín: UTB, 2009. Technologická fakulta, zápisky z přednášek.
- [12] DVOŘÁK, Z. *Zpracovatelské procesy gumárenské pro konstrukční směry*. Zlín: UTB, 2009, Technologická fakulta, elektronická podpora. 130 s.
<http://www.ft.utb.cz/czech/uvi/czech/staff/dvorak/elektronickepodpory/pdf/T8ZPG_zpracovatelske_procesy_gumarenske.pdf>
- [13] MAŇAS, M., STANĚK, M., MAŇAS, D., *Výrobní stroje I: Stroje gumárenské a plastikářské I*. UTB ve Zlíně, 2007. 264 s. ISBN 80- 7318- 596- 1
- [14] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. UTB ve Zlíně, 2007. 105 s. ISBN 80-7318-431-5

- [15] OVSÍK, M. *Studie tvarového faktoru elastomerních prvků*. Zlín: UTB, 2007. Technologická fakulta, diplomová práce, 160 s.
- [16] BLAŽEK, R. *Vliv teploty na mechanické vlastnosti pryžových výrobků*. Zlín: UTB, 2008. Technologická fakulta, diplomová práce, 145 s.
- [17] HLAVA, M. *Vliv vulkanizačního systému na vlastnosti NBR a jeho adhezi ke kovu*. Zlín: UTB, 2009. Technologická fakulta, diplomová práce, 135 s.
- [18] KUTA, A. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Praha: VŠCHT, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ	tahové nebo tlakové napětí [MPa]
F	síla [N]
S	obsah průřezu(plochy) [m ²]
Δl	rozdíl délky po protažení(stlačení) a původní délky [m]
ε	poměrné prodložení(stlačení) [%]
l_0	původní délka [m]
k	konstanta(tuhost) pružiny [N/mm]
δ	deformace [mm]
τ	smykové napětí [MPa]
G	smykový modul pružnosti [MPa]
h	výška [mm]
R	vnější poloměr [mm]
r_0	poloměr otvoru(díry) [mm]
p	tlak [MPa]
D	vnější průměr [mm]
d	vnitřní průměr otvoru(díry) [mm]
f	tvarový faktor
ϕ	tvarová funkce
E	modul pružnosti v tlaku(tahu) [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Nejpoužívanější vulkanizační činidla[8]	21
Obr. 2. Účinnost plastikace v závislosti na teplotě [4]	25
Obr. 3. Schéma míchání na dvouválci [13]	26
Obr. 4. Hnětací stroje[13]	28
Obr. 5. Vulkanizační křivka[12]	32
Obr. 6. Schéma měření Mooney viskozity [11]	33
Obr. 7. Přibližný grafický výsledek Mooney viskozity [11]	34
Obr. 10. Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [9], [11]	35
Obr. 11. Zkouška tvrdosti podle Brinella [11]	37
Obr. 12. Zkouška tvrdosti podle Vickerse [11]	37
Obr. 13. Tvrdost Shore	38
Obr. 14. Jednoosý tah elastomerního prvku [14]	39
Obr. 15. Elementární krychle [14]	39
Obr. 16. 3D deformace[14]	41
Obr. 17. Smluvní inženýrské napětí[14]	42
Obr. 18. Skutečné napětí[14]	43
Obr. 19. Závislost zatížení na deformaci pružiny [14]	45
Obr. 20. Pružiny vedle sebe [14]	46
Obr. 21. Uspořádání pružin za sebou [14]	46
Obr. 22. Lineárně smyková pružina	47
Obr. 23. Konstrukční úprava lineárně smykové pružiny [14]	48
Obr. 24. Rotačně- symetrická lineárně smyková pružina namáhaná axiální silou [14]	49
Obr. 25. Konstrukční úprava rotačně symetrické lineární smykové pružiny [14]	50
Obr. 26. Rotačně smykový válcový prvek [14]	51
Obr. 27. Konstrukční tvarová úprava rotačně- symetrického válcového prvku [14]	53
Obr. 28. Torzní pružina [14]	54
Obr. 29. Tlaková pružina [14]	56
Obr. 30. Pružina typu dlouhého pásu [14]	59
Obr. 31. Vícevrstvá pružina [14]	59
Obr. 32. Rozměry průřezů elastomerních zkušebních těles	64
Obr. 33. Vázaná tlaková pružina	65

Obr. 34. Závislost napětí na deformaci tělesa 1	67
Obr. 35. Závislost napětí na deformaci tělesa 2	68
Obr. 36. Závislost napětí na deformaci tělesa 3	69
Obr. 37. Závislost napětí na deformaci tělesa 4	70
Obr. 38. Grafické srovnání nevázaných pružin plného průřezu	71
Obr. 39. Závislost napětí na deformaci tělesa 5	72
Obr. 40. Závislost napětí na deformaci tělesa 6	73
Obr. 41. Závislost napětí na deformaci tělesa 7	74
Obr. 42. Závislost napětí na deformaci tělesa 8	75
Obr. 43. Grafické srovnání vázaných pružin plného průřezu	76
Obr. 44. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny výšky 12,5 mm	76
Obr. 45. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny výšky 20 mm	77
Obr. 46. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny výšky 30 mm	77
Obr. 47. Závislost napětí na deformaci tělesa 9	78
Obr. 48. Závislost napětí na deformaci tělesa 10	79
Obr. 49. Závislost napětí na deformaci tělesa 11	80
Obr. 50. Závislost napětí na deformaci tělesa 12	81
Obr. 51. Grafické srovnání nevázaných pružin s kruhovým otvorem	82
Obr. 52. Závislost napětí na deformaci tělesa 13	83
Obr. 53. Závislost napětí na deformaci tělesa 14	84
Obr. 54. Závislost napětí na deformaci tělesa 15	85
Obr. 55. Závislost napětí na deformaci tělesa 16	86
Obr. 56. Grafické srovnání vázaných pružin s kruhovým otvorem	87
Obr. 57. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny s otvorem výšky 12 mm	87
Obr. 58. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny s otvorem výšky 20 mm	88
Obr. 59. Grafické porovnání vázané a nevázané pružiny s otvorem výšky 30 mm	88
Obr. 60. Schéma tlakové válcové pružiny s dírou	90
Obr. 61. Napjatost a deformace pružiny o výšce 12,5 mm	101
Obr. 62. Napjatost a deformace pružiny o výšce 20 mm	102
Obr. 63. Napjatost a deformace pružiny o výšce 30 mm	103
Obr. 64. Napjatost a deformace pružiny výšky 100 mm	104
Obr. 65. Graf závislosti deformace na výšce pružiny při $p = 1,5\text{MPa}$	105
Obr. 66. Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku	106

Obr. 67. Schéma zkoušky nafukování	106
Obr. 68. Dvou-parametrový Mooney- Rivlin	107
Obr. 69. Napjatost a deformace pružiny o výšce 12,5 mm	108
Obr. 70. Napjatost a deformace pružiny o výšce 20 mm	109
Obr. 71. Napjatost a deformace pružiny o výšce 30 mm	110
Obr. 72. Napjatost a deformace pružiny výšky 100 mm	111
Obr. 73. Graf závislosti deformace na tlakovém zatížení jednotlivých výšek pružin při nelineárním modelování	112
Obr. 74. Napjatost a deformace pružiny výšky 12,5 mm	114
Obr. 75. Napjatost a deformace pružiny výšky 20 mm	115
Obr. 76. Napjatost a deformace pružiny výšky 30 mm	116
Obr. 77. Napjatost a deformace pružiny výšky 100 mm	118
Obr. 78. Graf závislosti deformace na tlakovém zatížení jednotlivých výšek pružin při modelování	119
Obr. 79. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 12,5 mm	120
Obr. 80. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 12,5 mm	121
Obr. 81. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 20 mm	123
Obr. 82. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 20 mm	124
Obr. 83. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 30 mm	124
Obr. 84. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 30 mm	125
Obr. 85. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 100 mm	125
Obr. 86. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 100 mm	126
Obr. 87. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 12,5 mm	127
Obr. 88. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 12,5 mm	127
Obr. 89. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 20 mm	129
Obr. 90. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 20 mm	129
Obr. 91. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 30 mm	130
Obr. 92. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 30 mm	131
Obr. 93. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 100 mm	132
Obr. 94. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 100 mm	132
Obr. 95. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 12,5 mm	134
Obr. 96. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 12,5 mm	134
Obr. 97. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 20 mm	136

Obr. 98. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 20 mm	136
Obr. 99. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 30 mm	137
Obr. 100. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 30 mm	137
Obr. 101. Závislost napětí na deformaci nevázané pružiny výšky 100 mm	138
Obr. 102. Závislost napětí na deformaci vázané pružiny výšky 100 mm	139

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Složení kaučukové směsi.....	13
Tab. 2. Rozměry tělesa 1.....	67
Tab. 3. Experimentální hodnoty tělesa 1	67
Tab. 4. Rozměry tělesa 2.....	68
Tab. 5. Experimentální hodnoty tělesa 2	68
Tab. 6. Rozměry tělesa 3.....	69
Tab. 7. Experimentální hodnoty tělesa 3	69
Tab. 8. Rozměry tělesa 4.....	70
Tab. 9. Experimentální hodnoty tělesa 4	70
Tab. 10. Rozměry tělesa 5.....	72
Tab. 11. Experimentální hodnoty tělesa 5	72
Tab. 12. Rozměry tělesa 6.....	73
Tab. 13. Experimentální hodnoty tělesa 6	73
Tab. 14. Rozměry tělesa 7.....	74
Tab. 15. Experimentální hodnoty tělesa 7	74
Tab. 16. Rozměry tělesa 8.....	75
Tab. 17. Experimentální hodnoty tělesa 8	75
Tab. 18. Rozměry tělesa 9.....	78
Tab. 19. Experimentální hodnoty tělesa 9	78
Tab. 20. Rozměry tělesa 12.....	79
Tab. 21. Experimentální hodnoty tělesa 10	79
Tab. 22. Rozměry tělesa 11.....	80
Tab. 23. Experimentální hodnoty tělesa 11	80
Tab. 24. Rozměry tělesa 12.....	81
Tab. 25. Experimentální hodnoty tělesa 12	81
Tab. 26. Rozměry tělesa 13.....	83
Tab. 27. Experimentální hodnoty tělesa 13	83
Tab. 28. Rozměry tělesa 14.....	84
Tab. 29. Experimentální hodnoty tělesa 14	84
Tab. 30. Rozměry tělesa 15.....	85
Tab. 31. Experimentální hodnoty tělesa 15	85

Tab. 32. Rozměry tělesa 16.....	86
Tab. 33. Experimentální hodnoty tělesa 16	86
Tab. 34. Rozměry tělesa 5.....	95
Tab. 35. Rozměry tělesa 6.....	95
Tab. 36. Rozměry tělesa 7.....	96
Tab. 37. Rozměry tělesa 8.....	96
Tab. 38. Rozměry tělesa 13.....	97
Tab. 39. Rozměry tělesa 14.....	97
Tab. 40. Rozměry tělesa 15.....	98
Tab. 41. Rozměry tělesa 16.....	98
Tab. 42. Rozměry tělesa 4.....	99
Tab. 43. Experimentální hodnoty tělesa 4	100
Tab. 44. Rozměry lineárně modelované pružiny 1	100
Tab. 45. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 12,5 mm	101
Tab. 46. Rozměry lineárně modelované pružiny 2	102
Tab. 47. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 20 mm	102
Tab. 48. Rozměry lineárně modelované pružiny 3	102
Tab. 49. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 30 mm	103
Tab. 50. Rozměry lineárně modelované pružiny 4	103
Tab. 51. Hodnoty modelování pro pružinu výšky 100 mm	104
Tab. 52. Hyperelastické konstanty Mooney- Rivlin	107
Tab. 53. Rozměry nelineárně modelované pružiny 1	108
Tab. 54. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 12,5 mm.....	108
Tab. 55. Rozměry nelineárně modelované pružiny 2	109
Tab. 56. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 20 mm.....	109
Tab. 57. Rozměry nelineárně modelované pružiny 3	110
Tab. 58. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 30 mm.....	110
Tab. 59. Rozměry nelineárně modelované pružiny 4	111
Tab. 60. Výsledky nelineárního modelování pružiny výšky 100 mm.....	112
Tab. 61. Rozměry tělesa 4.....	113
Tab. 62. Experimentální hodnoty tělesa 4	113
Tab. 63. Rozměry modelované pružiny 1	114
Tab. 64. Výsledky modelování pružiny výšky 12,5 mm.....	115

Tab. 65. Rozměry modelované pružiny 2	115
Tab. 66. Výsledky modelování pružiny výšky 20 mm.....	116
Tab. 67. Rozměry modelované pružiny 3	116
Tab. 68. Výsledky modelování pružiny výšky 30 mm.....	117
Tab. 69. Rozměry nelineárně modelované pružiny 4	117
Tab. 70. Výsledky modelování pružiny výšky 100 mm.....	118
Tab. 71. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 12,5 mm	123
Tab. 72. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 20 mm	124
Tab. 73. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 30 mm	125
Tab. 74. Porovnání experiment- výpočet pružiny výšky 100 mm	126
Tab. 75. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 12,5 mm.....	128
Tab. 76. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 20 mm.....	130
Tab. 77. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 30 mm.....	131
Tab. 78. Porovnání experiment-lineární model pružiny výšky 100 mm.....	132
Tab. 79. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 12,5 mm.....	135
Tab. 80. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 20 mm.....	136
Tab. 81. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 30 mm.....	138
Tab. 82. Porovnání experiment-nelineární model pružiny výšky 100 mm.....	139
Tab. 83. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky 12,5 mm...	140
Tab. 84. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky 20 mm.....	140
Tab. 85. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky 30 mm.....	140
Tab. 86. Porovnání nelineárního a Neohookeovského modelu pružiny výšky 100 mm....	140

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Tahová zkouška, materiál S 1234

Příloha P II: Zkouška nafukováním, materiál S 1234

PŘÍLOHA P I: TAHOVÁ ZKOUŠKA, MATERIÁL S 1234 [16]

Těleso 1		Těleso 2		Těleso 3		Těleso 4	
$\epsilon[-]$	$\sigma[\text{Pa}]$	$\epsilon[-]$	$\sigma[\text{Pa}]$	$\epsilon[-]$	$\sigma[\text{Pa}]$	$\epsilon[-]$	$\sigma[\text{Pa}]$
0	0	0	0	0	0	0	0
0,015	133286	0,024	220433	0,016	155707	0,017	161311
0,041	230481	0,043	252725	0,042	255118	0,045	303503
0,071	369105	0,073	339597	0,072	337934	0,066	335395
0,113	429892	0,083	374329	0,087	366315	0,095	408981
0,145	493069	0,12	436392	0,118	437345	0,115	435893
0,172	556326	0,138	468684	0,149	501241	0,147	499679
0,195	561185	0,167	523263	0,165	524891	0,162	526591
0,223	619503	0,196	577924	0,197	569867	0,194	580575
0,243	641412	0,214	602733	0,217	593517	0,21	600177
0,273	682760	0,243	649911	0,248	643223	0,241	654081
0,293	702199	0,274	699528	0,26	671604	0,274	690874
0,32	755656	0,291	714414	0,295	702388	0,289	710476
0,34	755660	0,322	749227	0,323	747364	0,321	747269
0,355	784815	0,341	766553	0,34	768688	0,339	761970
0,387	821303	0,373	808769	0,373	804125	0,372	801253
0,418	855402	0,388	823654	0,383	896480	0,39	820855
0,433	872371	0,418	868310	0,445	910670	0,419	852667
0,46	903999	0,425	898162	0,482	993486	0,431	918862
0,497	933158	0,411	955263	0,573	1010000	0,42	967947
0,515	950207	0,425	972588	0,591	1021870	0,462	975257
0,516	989085	0,522	937856	0,619	1050250	0,549	963046
0,522	1013380	0,537	982512	0,632	1073900	0,568	1016950
0,526	1023100	0,565	1019770	0,663	1099950	0,588	1026750
0,597	1030430	0,581	1037170	0,686	1185170	0,621	1056150

PŘÍLOHA P II: ZKOUŠKA NAFUKOVÁNÍM, MATERIÁL S 1234 [16]

Tlak p [kPa]	Poloměr R [mm]	Délka oblouku L [mm]
0	27,206	14,2383
20	54,199	14,8351
31	48,6562	14,7712
47	65,8501	15,6257
61	24,7864	16,0395
70	44,0252	16,4893
85	38,0711	17,7049
89	35,9133	18,2539
95	31,8105	18,8396
100	26,8372	19,12
104	32,0374	20,3336
108	27,5259	20,7228
111	27,5219	22,3109
115	28,2172	23,4395
118	29,3884	24,7207
122	31,1665	26,3965
126	30,3615	28,1636
128	34,0645	28,8149
131	33,5229	30,2891
134	35,7388	30,4731
138	35,5648	32,2842
140	36,224	33,0264
142	36,4726	34,4396
145	39,4442	34,4369
149	34,4255	34,9031
153	41,6039	36,2957
156	38,3597	37,1018
161	43,6073	38,1586
167	43,675	39,8764
172	45,2205	41,158
177	45,9053	43,2334
181	46,036	44,4956
186	50,3371	45,2543
192	47,9161	47,2288
197	51,2981	49,5393
202	51,819	49,7779
207	55,112	52,0905
209	56,9509	52,7539
212	60,0041	54,4885
231	57,6594	56,7219
237	62,0112	57,4766
239	67,2383	58,9921
240	77,7001	65,2508