

Využití zkoušky v tlaku pro charakteristiku elastomerů

Miroslav Kovář

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Miroslav Kovář
Osobní číslo:	T22558
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Využití zkoušky v tlaku pro charakteristiku elastomerů

Zásady pro vypracování

- Literární přehled
- Návrh metodiky
- Příprava a realizace experimentu
- Zpracování a vyhodnocení výsledků

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BROWN, R. *Physical Testing of Rubber*. New York: Springer, 2006. VIII, 388 s. ISBN 978-0-387-28286-2.

SUTTON, M.A., ORTEU, J.J., SCHREIER, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US, 2009, 321 s. ISBN 978-0-387-78746-6.

EIRICH, F. R., ERMAN, B., MARK, J.D. *Science and technology of rubber*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. 743 s. ISBN 0124647863.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem 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.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením mechanických vlastností daných elastomerů pomocí tlakové zkoušky a zkoušky dvouosé napjatosti. V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti kaučuků, složení kaučukových směsí, principy hyperelasticity a jednotlivé hyperelastické modely. Praktická část se zaměřuje na experimentální měření závislosti napětí na poměrné deformaci při dvou typech mechanického zatěžování. Výsledky práce byly zpracovány pomocí systémů Mercury RT a TRAPEZIUM a vyhodnoceny formou tabulek a grafů.

Klíčová slova: elastomer, tlaková zkouška, dvouosá napjatost, čistý smyk, hyperelasticita, mechanické zkoušky, kaučuk, polymery

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on determining the mechanical properties of selected elastomers using a compression test and a biaxial tension test. The theoretical part describes the fundamental properties of rubbers, the composition of rubber compounds, the principles of hyperelasticity, and various hyperelastic models. The practical part is focused on experimental measurements of the stress-strain relationship under two types of mechanical loading. The results were processed using Mercury RT and TRAPEZIUM software and evaluated in the form of tables and graphs.

Keywords: elastomer, compression test, biaxial tension, pure shear, hyperelasticity, mechanical testing, rubber, polymers

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své bakalářské práce, doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D., za příjemný přístup, odborné vedení, cenné rady, trpělivost a podporu během celého zpracování práce. Dále děkuji Ing. Barboře Kotlánové za ochotu a pomoc při nastavování kamerového systému a za zaškolení v softwaru používaném při měření dvouosé napjatosti. Velké díky patří také Bc. Vojtěchu Duškovi za jeho ochotu a rady. V neposlední řadě děkuji své rodině, přítelkyni a kamarádům za podporu v průběhu této práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KAČUKY	13
1.1 PŘÍRODNÍ KAČUKY	13
1.1.1 Výskyt a zpracování	14
1.2 SYNTETICKÉ KAČUKY	15
1.2.1 Syntetické kačuky pro všeobecné použití	15
1.2.2 Speciální syntetické kačuky	17
2 KAČUKOVÉ SMĚSI	20
2.1 PLNIVA	21
2.2 ANTIDEGRADANTY	22
2.3 ZMĚKČOVADLA	22
2.4 VULKANIZAČNÍ SYSTÉMY	23
2.4.1 Vulkanizační činidla	23
2.4.2 Aktivátory	23
2.4.3 Urychlovače	23
2.4.4 Retardéry	24
2.5 ZVLÁŠTNÍ PŘÍSADY	24
2.5.1 Nadouvadla	24
2.5.2 Plastikační činidla	24
2.5.3 Faktisy	24
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	25
3.1 HYPERELASTICITA	25
3.2 HYPERELASTICKÉ MODELY	26
3.2.1 Polynomický model	28
3.2.2 Neo-Hookean model	28
3.2.3 Mooney-Rivlin model	29
3.2.4 Yeoh model	30
3.2.5 Ogden model	30
3.2.6 Gent model	31
3.2.7 Arruda-Boyce model	31
3.3 MECHANICKÉ MÓDY ELASTOMERŮ	32
3.3.1 Jednoosá napjatost	32
3.3.2 Dvouosá napjatost	34
3.3.3 Čistý smyk	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
4 CÍL PRÁCE	38
4.1 ZKOUŠENÝ MATERIÁL	38

4.2	ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI	38
4.2.1	Zkušební tělesa	38
4.2.2	Podmínky měření	39
4.2.3	Zkušební zařízení	39
4.2.4	Postup měření	40
4.2.5	Zpracování výsledků	42
4.3	ZKOUŠKA TLAKEM	42
4.3.1	Zkušební tělesa	42
4.3.2	Podmínky měření	43
4.3.3	Zkušební zařízení	43
4.3.4	Postup měření	44
4.3.5	Zpracování výsledků	46
5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	47
5.1	ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI	47
5.2	TLAKOVÁ ZKOUŠKA	48
5.3	SROVNÁNÍ ZKOUŠEK.....	54
6	DISKUSE VÝSLEDKŮ	56
	ZÁVĚR.....	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
	SEZNAM TABULEK.....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65

ÚVOD

Elastomery představují specifickou skupinu polymerních materiálů, které se vyznačují schopností značné elastické deformace a následného návratu do původního tvaru po odstranění působící síly. Tato vlastnost, označovaná jako hyperelastická, je umožněna díky specifické vnitřní struktuře elastomerů, která je tvořena dlouhými polymerními řetězci s určitým stupněm zesíťování. Elastomery jsou schopny měnit svůj tvar působením relativně nízkých sil, a přesto si zachovávají svoji funkčnost v širokém rozsahu deformací. V důsledku těchto vlastností se elastomery hojně využívají v celé řadě průmyslových odvětví – například v automobilovém průmyslu (těsnění, silentbloky, pneumatiky), ve stavebnictví, elektrotechnice, zdravotnictví i spotřebním zboží.

Pro účinné a bezpečné použití výrobků z elastomerů je nezbytné detailně znát jejich mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti, jako je například tuhost, pevnost, tažnost nebo odolnost vůči stlačení, jsou zásadní při navrhování a optimalizaci finálních produktů. Charakterizace elastomerů se provádí prostřednictvím různých typů mechanických zkoušek, přičemž mezi nejběžnější patří zkoušky v tahu nebo v tlaku. Standardní zkušební metody však mnohdy neposkytují dostatečně přesný popis chování elastomerů při složitějších deformačních stavech, které se v praxi a v reálných aplikacích běžně vyskytují.

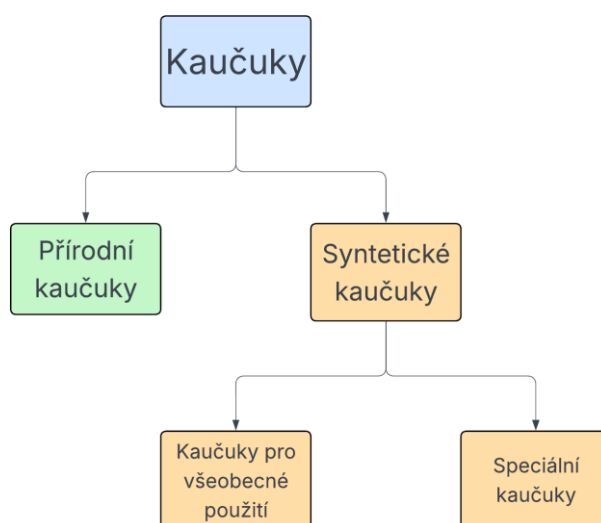
Z tohoto důvodu se v posledních letech rozvíjí také alternativní metody mechanického zatěžování, jako je zkouška dvouosé napjatosti nebo čistý smyk. Tyto zkoušky umožňují získat komplexnější data o chování materiálu a lépe slouží pro kalibraci hyperelastických materiálových modelů, jako jsou např. Mooney-Rivlin, Neo-Hookean nebo Ogden. Pro přesné matematické modelování deformace elastomerů je přitom nutné získat data z více typů zatěžovacích režimů, které společně umožní přesnější popis reálného chování materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KAUČUKY

Kaučuk se poprvé dostal do Evropy již v roce 1496 a to v podobě míčů, jež přivezl Kryštof Kolumbus z Ameriky. Ale jeho využití začalo až v polovině 19. století ve formě kostek kaučuku určených ke gumování písma. Průlom průmyslového použití kaučuku nastal v roce 1844 vynálezem vulkanizace sírou, o nějž se postaral Americký vynálezce Charles Goodyear.[1; 2]

Kaučuk se řadí mezi polymerní materiály, konkrétně elastomery, a je buď přírodního anebo syntetického původu. Jejich nejtypičtější vlastnost je elastická deformace. Tedy schopnost materiálu být výrazně deformován působením vnější síly a po ukončení jejího působení znovu nabýt původního tvaru. Tuto vlastnost mají elastomery jak před vulkanizací, tak i po ní. Surový nezpracovaný kaučuk je za tepla lepidlivý a za studena tuhý a neelastický. Ten lze řádným zesíťováním které vznikne v průběhu vulkanizace převést na elastomer neboli pryž, která je elastická v širokém rozmezí teplot. [2; 3; 4]



Obrázek 1 Základní rozdělení kaučuků

(zdroj: vlastní)

1.1 Přírodní kaučuky

Kaučuk je možno v přírodě nalézt přibližně v 2000 druzích rostlin které mohou být v podobě keřů, stromů i bylin. Nejčastěji využívaný a také ten nejdůležitější je strom *Hevea Brasiliensis* neboli *kaučukovník brazilský*. Přírodní kaučuk můžeme značit NR. Tato zkratka je odvozena z anglického výrazu natural rubber. A volně se v přírodě vyskytuje ve formě bílé tekutiny, jež se nazývá Latex, která svým vzhledem připomíná mléko. [2; 5]

1.1.1 Výskyt a zpracování

Latex je zpracováván na kaučukových plantážích, z nichž ty největší se vyskytují na území Asie, Indonésie anebo Thajska. Ze stromů se získává nařezáním jeho kůry, z níž bude vytékat latexové mléko a následným čepováním (Obr. 2).



Obrázek 2 Těžba přírodního kaučuku

(zdroj: [5])

Latexové mléko je zachycováno v nachystaných nádobách jako jsou například misky či PET lahve. Z jednoho stromu kaučukovníku lze získat 5 až 25 kg latexu. Ten se před přípravou vlastní směsi musí zpracovat, a to pomocí Lámaní kaučuku. Při tomto procesu se nadbytečně dlouhé řetězce štěpí na kratší, a to působením kyslíku a mechanické energie. Nadále je srážen např. kyselinou mravenčí, prán vodou a poté sušen na materiál nazývaný krepa. Po dalším upravení, a to přimícháním dalších aditiv a plniv a vulkanizací, vznikne přírodní kaučuk neboli pryž. [2; 5; 6; 7; 8]

1.2 Syntetické kaučuky

Poté co se ve světě zvýšila spotřeba přírodního kaučuku a Angličané omezili jeho těžbu, aby uměle zvedli ceny, byly státy závislé na jeho importu nuceny hledat jeho náhradu. Vůbec prvním synteticky vytvořeným kaučukem se stal isoprenový kaučuk (obdoba NR) neboli polyisopren který vytvořila roku 1909 německá firma Bayer. V Rusku byl poté v roce 1910 vyvinut butadienový kaučuk známý také jako polybutadien. Prvním komerčně prosperujícím syntetickým kaučukem byl chloroprenový kaučuk známý spíše jako neopren, jenž vyvinula uvedla na trh firma DuPont roku 1931.[9; 10]

Syntetické a přírodní kaučuky se vzájemně liší svými vlastnostmi a způsobem výroby. Zatímco NR jsou produkovány ze stromu jako je třeba *Hevea Brasiliensis*, syntetické kaučuky jsou vytvářeny uměle. Ty se vyrábí pomocí polymerace či kopolymerace. Jejich vlastnosti jsou upravovány a vylepšovány pomocí stabilizátorů, plastifikátorů, plniv či antioxidantů. Dále mohou být jejich vlastnosti upraveny kombinací více druhů kaučuků. Syntetické kaučuky se dále rozdělují na dvě skupiny. A to na kaučuky pro všeobecné použití a na speciální kaučuky. [2; 3; 7; 9]

1.2.1 Syntetické kaučuky pro všeobecné použití

Kaučuky pro všeobecné použití jsou typické velkým objemem výroby a svou nízkou cenou. Právě proto se z nich vyrábí většina obvykle používaných pryžových výrobků. Výsledné pryže jsou vyznačovány dobrou odrazovou pružností, odolností proti oděru a vysokou pevností. Za to mají špatnou odolnost vůči stárnutí, z toho důvodu je vhodné užití stabilizátorů. Dále taky mohou být napadány olejem či benzínem, a to proto že jsou téměř nepolární. [3]

Vyrábí se z nich široká škála výrobků jako jsou třeba hadice, pneumatiky, míčky na golf, podrážky bot, nátěry a lepidla. Dále slouží k výrobě zdravotnických materiálů a technické pryže. [3]



Obrázek 3 Výrobky z kaučuků pro všeobecné použití

(zdroj: [3])

Mezi syntetické kaučuky pro všeobecné použití patří:

- Butadienový kaučuk (BR)

Je vyráběn pomocí polymerace v roztoku s pomocí kovových katalyzátorů. Zpravidla jsou jeho vlastnosti horší jak u NR. Samotný je hůře zpracovatelný a z toho důvodu je často využíván jako příměs s dalšími nepolárními kaučuky. Dále nachází využití v automobilovém průmyslu, kde se z něj vyrábí pneumatiky a autopláště. [9; 11]

- Butadien-styrenový kaučuk (SRB)

Je vyráběn za pomoci kopolymerace butadienu se styrenu, výsledek je v podobě latexu. Butadien i styren patří mezi monomery jež jsou za použití různorodých metod velice ochotně polymerující. Proto je z nich lze vyrobit bohaté spektrum látek. Dále je dle způsobu výroby můžeme rozlišit na například E-SBR, který je vyráběn v emulzní (obvyklý obsah styrenu je 23,5 %), nebo na S-SRB který je vyráběn roztokovým způsobem (lze měnit obsah jak styrenu tak i butadienu). Patří mezi nejrozšířenější a nejužívanější syntetické kaučuky s velikou škálou využití a vlastnostmi které se téměř dají srovnávat s NR. Má o něco vyšší teplotní odolnost, zato má však horší vlastnosti při dynamickém zatížení. [9; 11]

- Ethylen-propylenový kaučuk (EPM a EPDM)

Jeho výroba je uskutečněna pomocí kopolymerace etylenu a propylenu. Vlastnosti ovlivňuje převážně poměr monomerů etylenu a polypropylenu. Neobsahuje žádné dvojné vazby a proto k zesíťování nelze použít síru. Vulkanizace probíhá za pomoci peroxidů nebo radiace. Pokud je v řetězci také obsažen třetí kopolymer a to nekonjugovaný dien, vzniká ethylen-propylen-dienový kaučuk (EPDM). Mezi jejich vlastnosti se řadí odolnost vůči vodě, povětrnosti, ozonu a stárnutí. Využití nachází k výrobě hadic, kabelů, střešních krytin a jako izolace nádrží na vodu. [11]

- Isoprenový kaučuk (IR)

Je vyráběn polymerací v roztoku a za pomoci dvou iniciačních systémů. Mezi ty se řadí katalyzátory Zieglerova typu a akylitiové katalyzátory. Jeho struktura nejvíce připomíná přírodní kaučuk, proto jsou také jejich vlastnosti podobné. Na rozdíl od NR u něj odpadá potřeba plastikace a jelikož v něm nejsou

obsaženy proteiny je možné jeho antialergického využití v zdravotnictví. [9; 11; 12]

1.2.2 Speciální syntetické kaučuky

Ve speciálních případech, kdy nejsou možné použít kaučuky pro všeobecné použití anebo jsou právě jejich vlastnosti nedostačující, je nutno použít speciální kaučuky. To nastává obzvláště v situacích, kdy je potřeba odolnost vůči vysokým teplotám nebo odolnost proti olejům. Dle toho se také speciální kaučuky dělí na teplovzdorné a olejovzdorné. Teplovzdorné nachází využití pro výrobu izolací a tepelně namáhaných součástek, popřípadě v lékařském průmyslu. Olejovzdorné zase pro výrobu hadic, těsnění, obuvi, neoprenů a kombinéz. Také platí že čím více je olej polárnější, o to více musí být i použitý kaučuk. [3]

Rozděluje se tedy na teplovzdorné:

- Silikonový kaučuk (Q)

Mohou být používány v rozmezí teplot od $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. A jejich typickým rysem je to že jejich vlastnosti se vlivem teplot mění pouze minimálně. Ve vlhkém prostředí však při vyšších teplotách podléhají hydrolyze a rozpadají se. Proto se při vysokých teplotách používají převážně v suchém prostředí. Vyrábí se z nich tepelně namáhané díly, izolace vodičů namáhaných teplem, těsnění dveří letadel a O-kroužky. Díky své zdravotní nezávadnosti je také využíván jak v potravinářském, tak ve farmaceutickém průmyslu, kde se z něj vyrábí dětské dudlíky nebo ochranné masky. [3; 13; 14]

- Fluorouhlíkový kaučuk (FPM)

Jsou vyráběny kopolymerací vinylidenfluoridu a monomerů obsahujících fluor. Jeho obchodní označení je Viton, v Americe se můžeme setkat s označením FKM. Mezi jeho vlastnosti spadá vysoká tepelná odolnost do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (V některých případech až do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dále dobrá nepropustnost plynů a odolnost vůči chemickým látkám a agresivním olejům. Využívá se v automobilovém i leteckém průmyslu. Dále nachází využití pro výrobu hadic na přepravu paliv či izolace kabelů. [15; 16; 17]



Obrázek 4 Ukázka fluorouhlíkového kaučuku

(zdroj: [17])

A dále také na olejovzdorné:

- Chloroprenový kaučuk (CR)

Vzniká pomocí polymerace chloroprenových monomerů. A vzniklý materiál je v podobě vloček béžové, bílé nebo světle hnědé barvy. Mezi jeho kvality se řadí odolnost vůči oxidaci a stárnutí. Dále také odolnost proti vysokým teplotám a samozřejmě odolnost vůči olejům, tukům i třeba ozonu. Využívá se pro olejová těsnění, ochranné kryty a rukavice, podložky a trubky. [18; 19]

- Akrylátový kaučuk (ACM)

Vzniká pomocí suspenzní či emulzní polymerace merů butylakrylátu a ethylakrylátu. Je možné jej použít do teploty až 180 °C, ale kvůli jeho špatné pružnosti a pevnosti v tahu při nízkých teplotách, může být použit pouze do - 10 °C. Patří mezi cenově nákladnější typy syntetických kaučuků (např. oproti CR nebo NBR). Je odolný vůči vysokým teplotám a olejům. Slouží k výrobě těsnění a hadic odolných proti oleji, používaných v automobilovém průmyslu. [3; 20; 21]



Obrázek 5 Ukázka akrylátového kaučuku

(zdroj: [21])

- Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR)

Je vyráběn kopolymerací akrylonitrilu (jeho obsah je mezi 20 až 50 %) a butadienu. Má dobrou odolnost proti oděru a odolává jak proti olejům, tak proti rostlinným i živočišným tukům. Mezi olejovzdornými kaučuky se řadí mezi ty finančně nejméně náročné. Využívá se k výrobě nejrůznějších těsnění a O-kroužků, dále také v automobilovém průmyslu na brzdové destičky. [22; 23]

- Polysulfidový kaučuk (OT)

Vyrábí se pomocí polykondenzační reakce mezi polysulfidem sodným a organickým dichloridem. Materiál má vynikající odolnost proti olejům a rozpouštědlům, i povětrnostním podmínkám. Jeho nevýhodou je však to že není teplovzdorný a má chabou mechanickou odolnost a pevnost při tlaku. Využití nachází při výrobě těsnění. [24; 25]



Obrázek 6 Ukázka polysulfidového kaučuku

(zdroj: [24])

2 KAUČUKOVÉ SMĚSI

Pryž nemůže být vytvořena pouze z čistého kaučuku. Z toho důvodu je nutnost kaučukové (gumárenské) směsi. Tu získáme přimícháním různorodých přísad, které směsi dodají požadované vlastnosti a umožní vulkanizaci. Kromě samotného kaučuku obsahuje směs také plniva, antidegradanty, změkčovadla, vulkanizační činidla, aktivátory, urychlovače, retardéry a podle potřeby další přísady jako jsou třeba pigmenty. Jednotlivé složky plní své specifické funkce, zároveň ale ovlivňují i vlastnosti výrobku a jeho zpracovatelnost. Nápodobně tak ovlivňují i jeho náklady na materiál a zpracovávání. Proto je potřeba jednotlivé přísady vybírat s přihlédnutím k jejich zpracovatelnosti, vlastnostem a ceně. [26; 27]



Obrázek 7 Přísady kaučukové směsi

(zdroj: [28])

Základem pro výrobu je vybrat správný kaučuk, popřípadě je možno zkombinovat více druhů kaučuku. Ten se svými vlastnostmi musí co nejvíce podobat základu směsi a jeho požadovaným vlastnostem. [26]

Důležitým údajem při přípravě kaučukové směsi je koncentrace. Ta se značí jako *dsk*, díly na 100 dílů kaučuku. Dále může být značena jako *phr* (pochází z anglického *parts per hundred rubber*). [26]

Jelikož je vývoj kaučukové směsi, která je konkurenceschopná velice finančně náročný, většina firem své metody a receptury nezveřejňuje, a naopak si je chrání. [26]

Průběh vývoje kaučukových směsí:

- Směs je namíchána podle specifikací dodaných zákazníkem
- Provedení zkoušky během provozu a potencionální upravení směsi
- Zhotovení zkušební série a upravení podmínek procesu
- Odzkoušení výrobku v praxi a možné provedení konečných úprav směsi a procesu [26]

Cíle vývoje kaučukových směsí:

- Zachovat nízké náklady na zpracování a materiály
- Zpracovatelnost na strojích, kterými daná firma disponuje
- Garance žádaných vlastností výrobku [26]

Všechny cíle musí být splněny, a to vyváženě. [26]

2.1 Plniva

Je pravda, že mezi základní složky kaučukové směsi se řadí kaučuk, změkčovač a vulkanizační systém, ale pokud by směs obsahovala pouze tyto složky, byla by nevhodná či spíše nepoužitelná pro technickou praxi. Z tohoto důvodu se do směsi přidávají plniva, která potřebné vlastnosti upraví. Mohou to být jak vlastnosti mechanické, tak vlastnosti dynamické a elektrické nebo také jejich zpracovatelnost. Dalším důležitým faktorem je snížení celkové ceny směsi, jelikož je možno použít cenově výhodná plniva. To, jaká plniva budou ve výsledné směsi použita, je třeba značně uvážit podle požadovaných vlastností chtěné směsi. [3; 29; 30]

Plniva mohou být v podobě drobných částic i různě dlouhých vláken, nejčastěji se však v praxi využívá plniv v podobě prášku – prášková plniva. [3; 29]



Obrázek 8 Ukázka plniv

(zdroj: [29])

Plniva rozlišujeme na aktivní, neaktivní a semi-aktivní. Aktivní plniva slouží především ke zlepšení a úpravě vlastností směsi, zatímco neaktivní slouží primárně ke snížení její ceny. Jelikož se ale mohou některá plniva chovat jako aktivní nebo i jako neaktivní podle toho v čem a jak jsou použity, jsou přezdívány semi-aktivní. Kvůli tomu je toto rozlišení občas matoucí a z toho důvodu se v praxi moc nevyužívá. Místo toho se v praxi rozlišují na saze, které vznikají nedokonalým spalováním ropy či různých plynů, a na světlá plniva, mezi než patří zbylá nesazová plniva. [31; 32]

2.2 Antidegradanty

Antidegradanty neboli také stabilizátory, jsou přísady chránící výrobky z polymerního materiálu před stárnutím, vlivy vnějšího okolí a zajišťují jeho stabilitu z dlouhodobého hlediska. Podle jejich funkce a ochrany se rozlišují na několik druhů. Antioxidanty chrání materiál vůči působení kyslíku a antiozonanty vůči působení ozónu. Dále na tepelné stabilizátory, ty zpomalují proces degradace a zlepšují odolnost materiálu proti zvýšeným teplotám. A světelné stabilizátory, jenž mají za úkol zpomalit degradaci způsobenou vlivem slunečního (UV) záření. Proto je nutno uvážit volbu správných antidegradantů v závislosti na tom, v jakém prostředí bude polymerní materiál použit a jaké vlivy tam na něj budou působit. [3; 31]

2.3 Změkčovadla

Jsou to přísady, které zlepšují ohebnost, rázovou houževnatost, tekutost a používají se ke zvýšení plasticity a snížení viskozity gumárenské směsi. Tím také zlepšují její zpracovatelnost. To vše ale na úkor ostatních vlastností daného polymeru. Jedná se o rozpouštědla a zředňovače. Používají se nízkomolekulární či tuhé látky, jenž musí být míchatelné s daným kaučukem. Nejčastěji jsou jako změkčovadla použity produkty ze

zpracování ropy a dřeva, nebo minerální oleje a tuky přírodního původu. Dále mohou být změkčovadla syntetického původu, například ftaláty a tereftaláty. Vhodné změkčovadlo se volí na základě srovnání parametrů rozpustnosti změkčovadla a polymeru. Čím více jsou si tyto hodnoty bližší, tím je lepší je vzájemná snášenlivost obou složek. [3; 26; 32]

2.4 Vulkanizační systémy

Vulkanizační systém je složen z přísad, jenž zásadním způsobem ovlivňují vlastnosti finálního výrobku a za jejichž pomoci je dosaženo požadovaných vlastností výsledné pryže. Jejich složení musí být navrženo tak aby bylo dosaženo kompromisu mezi vlastnostmi finálního výrobku, jeho zpracovatelností a jeho výslednou cenou.[26]

2.4.1 Vulkanizační činidla

Jde o základní složky kaučukové směsi. Ty dokážou vytvořit chemickou reakci příčných vazeb molekul uhlovodíku v kaučuku, což zajišťuje jejich zasítování. Tím se plastická gumárenská směs přemění v elastický vulkanizát. Pomocí vulkanizace lze dosáhnout například zvýšení pevnosti a tvrdosti, či zlepšení odrazové pružnosti. Vulkanizaci lze rozlišit na sirnou a bezsirnou. A mezi nejvíce využívaná vulkanizační činidla se řadí selen, síra, reaktivní pryskyřice, oxidy kovů a peroxidy. Zdaleka nejvyužívanější je však elementární nebo polymerní síra. Všechna činidla mají své typické specifické vlastnosti a díky tomu i různý vliv na konkrétní vulkanizát, a proto je nutné je volit s ohledem na požadované vlastnosti a druh kaučuku. [26; 31; 32]

2.4.2 Aktivátory

Jedná se jak o organické, tak i neorganické látky, díky nimž dochází k aktivaci vulkanizačních činidel, což zlepšuje působení síťování. Dále také napomáhají k zmenšení závislosti vulkanizace na teplotě. Z organických látek se využívají aminy, aminoalkoholy a především mastné kyseliny a jejich soli. Z anorganických látek jde poté o oxidy různých kovů jako jsou například oxid hořečnatý (MgO), oxid vápenatý (CaO) a v neposlední řadě nejvíce užívaný oxid zinečnatý (ZnO). [26; 31]

2.4.3 Urychlovače

Urychlovače se řadí mezi vůbec ty nejpodstatnější složky v gumárenské směsi. Mají zásadní vliv na to, jak samotná vulkanizace probíhá a také na to, jaké vlastnosti bude výsledný vulkanizát mít. Jejich hlavním úkolem je zkrátit dobu průběhu vulkanizace. Dále také mohou

v určitých okolnostech snižovat vulkanizační teplotu. Často jsou vzájemně kombinovány různé urychlovače, aby bylo dosaženo optimálního zpracování a vlastností. Mohou být rozděleny podle mnoha kritérií, v běžné praxi se však užívá rozdělení podle aktivity v procesu vulkanizace. Dle ní můžeme urychlovače rozdělit na pomalé, rychlé, velmi rychlé a ultra rychlé. [26; 31; 33]

2.4.4 Retardéry

Retardéry neboli také inhibitory vulkanizace, slouží ve směsi jako ochrana proti předčasnému navulkanizování. To může vzniknout v průběhu míchání a zpracování směsi, při němž je směs neustále vystavena teplotě. Neovlivňují tedy stav vulkanizace, ale pouze její zpracovatelskou bezpečnost. [3; 31]

2.5 Zvláštní přísady

Mezi další přídavky se řadí látky, jimž se přezdívá zvláštní přísady a patří mezi ně např. nadouvadla, faktisy a plastikační činidla. [31]

2.5.1 Nadouvadla

Tyto látky se do gumárenské směsi přidávají k výrobě lehčených hmot a pórovité pryže. Během zahřátí na vulkanizační teplotu a jejím působením, se nadouvadla rozkládají a uvolňují plyny. Ty pak ve vyrobené součásti vytváří dutiny a póry. Plynou složkou vzniklou po rozpadu je typicky oxid uhličitý anebo dusík. [3]

2.5.2 Plastikační činidla

Jedná se o aromatické sloučeniny, jenž se využívají k urychlení a zlepšení plastikace polymeru, což je zpracování kaučuku hnětením. Zlepšují jeho zpracovatelnost, a to tím že snižují jeho viskozitu a usnadňují míchání s ostatními složkami. Jako takové nesmí ovlivnit průběh samotné vulkanizace a ani výsledné vlastnosti vulkanizátu. Jako plastikační činidlo bývá použito různé pryskyřice a oleje. [31; 34]

2.5.3 Faktisy

Jde o přísady, které upravují vlastnosti finálního výrobku, jako je odolnost vůči oděru, rozměrová stabilita a jakost daného povrchu. Jedná se o vulkanizované oleje. Rozdělují se na faktis bílý a faktis hnědý. [26; 34]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ

Elastomery patří mezi polymerní materiály, jenž mají vysokou míru pružnosti a vratné deformace a jejich vlastnosti se od jiných materiálů výrazně liší. Elastomery se skládají z dlouhých řetězců atomů, jako je např. kyslík, uhlík či vodík. Tyto atomy jsou do jisté míry zesíťovány se sousedícími řetězci, a právě tyto zesíťované vazby zajišťují a dodávají materiálu schopnost vratné deformace po odstranění zatěžované síly. Jejich vlastnosti je možno obecně rozdělit dvěma způsoby, a to na vlastnosti chemické a vlastnosti fyzikální. Kromě druhu materiálu jsou jeho vlastnosti a reakce do velké míry ovlivněny druhem výroby a prostřednictvím vlivů vnějšího prostředí, mezi něž se řadí např. historie deformace, teplota nebo rychlost tažení. [35; 36]

Mezi vlastnosti fyzikální patří pružnost, tvrdost, plasticita, pevnost, houževnatost anebo také v neposlední řadě tepelná roztažnost. [35]

Mezi vlastnosti chemické se řadí jejich elektrické vlastnosti, odolnost materiálu proti kyselinám nebo odolnost a stabilita materiálu v rozličných prostředích. [35]

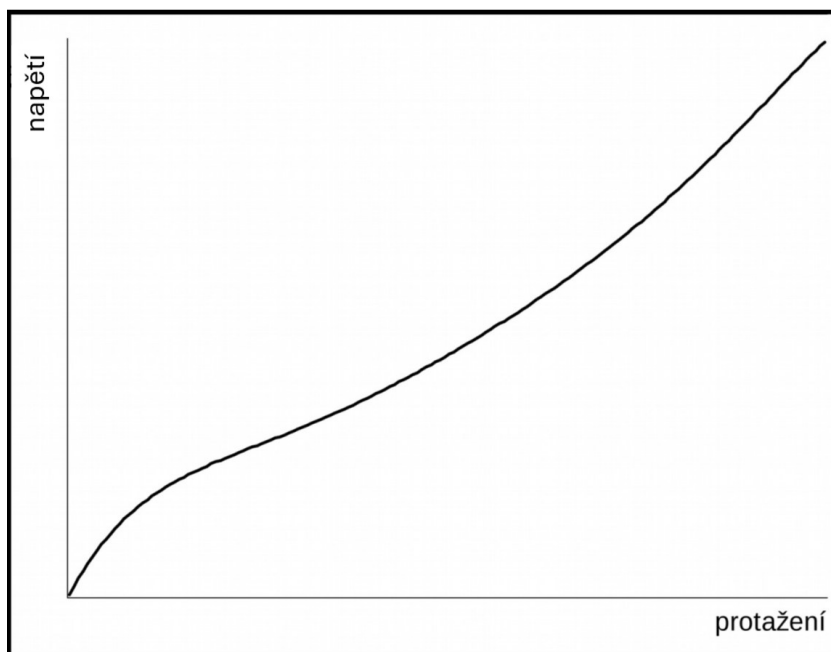
3.1 Hyperelasticita

Jedná se o charakteristickou vlastnost všech elastomerů, které se značí právě svou vysokou mírou elasticity, proto jsou brány jako hyperelastické. To je zásadním způsobem odlišuje od jiných druhů materiálů. [37]

Hyperelasticitu lze poznat dle několika charakteristických rysů jako jsou:

- Velké vratné deformace, které dosahují mnohonásobě větších hodnot jak u ostatních materiálů. A jejich tažnost je v řádech stovek procent oproti původním rozměrům.
- Závislost mezi napětím a deformací není lineární místo toho má typický esovitý průběh.
- Deformace materiálu nastane i za působení velmi malých sil. A hodnoty poměru napětí vůči deformaci jsou asi deseti tisíckrát menší jak u ideálně elastických materiálů.
- Velice vysoká objemová tuhost materiálu, což znamená že materiál má velkou odolnost proti změně svého objemu. Hyperelastické materiály jsou tedy brány jako objemově nestlačitelné. [37]

Jelikož jsou tyto charakteristické rysy elastomerního materiálu v rozporu s dvěma základními podmínkami pro Hookeuv zákon (závislost deformace a napětí jsou nelineární a deformace jsou příliš velké), nelze tedy Hookeova zákonu využít. I napříč tomu lze však tento vztah využít v aplikacích při kterých velké deformace nehrozí. Ale pro výpočty s vysokou přesností a pro velké deformace, je nutnost využití nelineárního popisu závislosti napětí na deformaci. [37]



Obrázek 9 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerních materiálů

(zdroj: [37])

3.2 Hyperelastické modely

Již od druhé poloviny dvacátého století probíhá usilovný vývoj těchto nelineárních hyperelastických materiálových modelů, které jsou založeny na měrné deformační energii W . Některé z těchto hyperelastických modelů vycházejí z mikromechanického popisu vnitřní struktury elastomerních materiálů, přičemž jejich materiálové konstanty mají konkrétní fyzikální význam. Oproti tomu tzv. fenomenologické materiálové modely jsou odvozeny z přímého pozorování makroskopického chování materiálů, ale obvykle však tyto modely postrádají přímý fyzikální význam svých materiálových konstant. [37]

Současné hyperelastické modely obvykle definují měrnou deformační energii W za pomoci matematického vyjádření:

$$W = f(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \quad (1)$$

anebo

$$W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\}) \quad (2)$$

Zde jsou I_i jako invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, hlavní protažení jsou λ_i a $\{M\}$ jako množina materiálových konstant. [37]

Protažení λ_i je definováno jako poměr délky tělesa po deformaci l_i ve směru osy i k jeho původní nedeformované délce l_0 .

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} \quad (3)$$

Definice deformačních invariant I_i lze pomocí rovnic vyjádřit jako:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (6)$$

Nestlačitelné materiály mají invariant $I_3=1$. [37]

Jestliže je známa deformační energie W , je možno napětí určit za pomoci derivace této funkce podle příslušné složky deformace.

$$S_{ij} = 2 \frac{W}{C_{ij}} \quad (7)$$

Zde jsou složky S_{ij} které představují 2.Piola-Kirchhoffův tenzor napětí a složky C_{ij} jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru.[37]

Při zvolení souřadného systému tak, že je shodný s hlavními směry deformace, je poté pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován vztahem:

$$C_{ij} \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Z rovnice (7) je tedy možné odvození vztahu jenž umožňuje výpočet složek Cauchyova tenzoru napětí. Jedná se o skutečné napětí.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2 \frac{W}{I_1} C_{ij} - 2 \frac{W}{I_2} C_{ij}^{-1} \quad (9)$$

Zde je p jako nespecifikovaný tlak a Kronekerovo delta δ_{ij} pro niž platí její podmínky ($\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j$). [37]

3.2.1 Polynomický model

Polynomická funkce je model, který vychází z prvního a druhého deformačního invariantu (I_1, I_2). Model je možné využít pro deformace které dosahují až 300 %. [37]

Model je definován jako:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j \quad (10)$$

Zde jsou koeficienty c_{ij} , což jsou materiálové konstanty, jenž charakterizují chování konkrétního materiálu. Index N určuje, kolik členů má polynomická suma a dosazuje se hodnota od jedné do nekonečna, v praxi však obvykle hodnota není větší jak 3. [37]

3.2.2 Neo-Hookean model

Tento model se řadí mezi nejstarší a také nejjednodušší hyperelastické modely. Lze jej chápat jako speciální případ polynomického modelu kde je $N = 1$ a $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$, přičemž μ je smykový modul. Tento model je založen na termodynamických principech a statickém popisu vnitřní struktury elastomerního materiálu. Jeho hlavní nevýhodou je to že nedokáže dobře popsat závěrečnou vyztužovací fázi v napěťově-deformační odezvě elastomerního materiálu. Kromě toho také vykazuje lineární chování při smykové deformaci. Je spolehlivý pro popis materiálového chování při jednoosém namáhání, pokud však deformace nepřesáhne 40 %. [35; 37]

Pro funkci W platí rovnice:

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) \quad (11)$$

Zde je μ jako počáteční smykový modul a je v podobě rovnice:

$$\mu = nkT \quad (12)$$

Zde n označuje počet polymerních řetězců na jednotku objemu, k je Boltzmannova konstanta a T představuje absolutní teplotu. [35; 37]

3.2.3 Mooney-Rivlin model

Byl navržen Mooneyem ve 40. letech 20. století jako fenomenologický model se dvěma parametry s předpokladem lineárního vztahu mezi zatížením a smykovou deformací při jednoduchém smyku. V 50. letech byl poté tento model upraven Rivlinem aby umožnil obecnější vyjádření měrné deformační energie díky deformačním invariantům. Model lze také chápat jako speciální případ polynomické funkce. Model má několik různých variant, které se liší počtem parametrů. Mohou být dvou, tři, pěti a devíti parametrové. Kde dvou-parametrový model patří do skupiny nejčastěji využívaných modelů a je možno jej použít pro deformace v rozmezí od devadesáti do sto procent, za podmínky že chování daného materiálu při stlačení je dostatečně charakterizováno. Pro deformace do 300 % je nutno použít pěti či devíti parametrové varianty modelu. [37]

Dvouparametrová varianta modelu odpovídá polynomické formě při $N = 1$ a je vyjádřen rovnicí:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (13)$$

Zde jsou c_{10} a c_{01} materiálové konstanty. [37]

Tříparametrová varianta modelu odpovídá polynomické formě při $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$ a je vyjádřen rovnicí:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (14)$$

Zde jsou c_{10} , c_{01} a c_{11} materiálové konstanty. [37]

Pětiparametrová varianta modelu odpovídá polynomické formě při $N = 2$ a je vyjádřen rovnicí:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (15)$$

Zde jsou c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} a c_{02} materiálové konstanty. [37]

Devítiparametrová varianta modelu odpovídá polynomické formě při $N = 3$ a je vyjádřen rovnicí:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (16)$$

Zde jsou c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} , a c_{03} materiálové konstanty. [37]

3.2.4 Yeoh model

Tento model se podobá polynomicke formě, avšak s tím rozdílem, že nevyužívá druhý deformační invariant. To znamená že se s ním lépe provádí výpočty, ale výsledky mohou být méně přesné. Zato má výhodu v jeho jednoduchosti. Nejčastěji se používá tříparametrový model s $N = 3$. Ten dobře popisuje chování materiálu ve velkém rozsahu deformací, avšak pro malé deformace není jeho přesnost příliš velká. [37]

Pro funkci W platí rovnice:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (17)$$

Zde je c_{i0} jako materiálová konstanta a index N udává počet členů jenž může být v rozsahu od jedné do nekonečna, avšak v praxi se většinou neužívá větší jak $N = 3$. Jestliže je index N zvolen jako $N = 1$, jde potom o Neo-Hookean model. [37]

3.2.5 Ogden model

Tento model byl navržen Ogdenem a vyjadřuje deformační energii přímo pomocí hodnot hlavních protažení. Je schopen s velkou přesností popsat chování elastomerního materiálu a to i za velkých deformací, které mohou dosahovat až 700 % hodnot. Při jistých podmínkách může model odpovídat jak Neo-Hookean modelu, tak Mooney-Rivlin modelu. [37]

Pro funkci W platí rovnice:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (18)$$

Zde jsou μ_i a α_i jako materiálové konstanty jenž nemají určitý fyzikální význam. Jako index N , který udává počet členů modelu, se dosazuje hodnota v rozsahu od jedné do nekonečna. V praxi však tato hodnota nebývá větší než $N = 3$. [37]

3.2.6 Gent model

Stejně jako Arruda-Boyceův model využívá principu konečného síťového protažení, avšak na rozdíl od něj nevychází z popisu vnitřní struktury materiálu. Také je oproti němu mnohem jednodušší, a to kvůli tomu že využívá pouze dvou materiálových konstant. Další jeho výhodou je to že dokáže dobře vystihnout závěrečnou vyztužovací fázi deformace. [37]

Pro funkci W platí rovnice:

$$W = \frac{-EI_m}{6} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (19)$$

Zde je počáteční modul pružnosti E , ten pro nestlačitelné materiály odpovídá hodnotě 3μ (μ je smykový modul). Hodnota I_m označuje limitní hodnotu výrazu $(I_1 - 3)$, což je obdobný parametr jako limitní protažení řetězců λ_L v modelu Arruda-Boyce. [37]

3.2.7 Arruda-Boyce model

Tento materiálový model je založen na mikromechanickém popisu vnitřní struktury elastomerních materiálů, tedy na tom, jak se jednotlivé polymerní řetězce v materiálu chovají. Lze jej chápat jako rozšíření Yeohova modelu kde $N = 5$ a konstanty mají reálný fyzikální význam. Je ideální pro popis deformací, jenž dosahují až 300 % hodnot. [37]

Pro funkci W platí rovnice:

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (20)$$

Zde jsou konstanty C_i definovány způsobem:

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750} \quad (21)$$

Zde je počáteční smykový modul μ a limitní protažení sítě struktury materiálu λ_L . [37]

3.3 Mechanické módy elastomerů

Znalost fyzikálních a mechanických vlastností materiálů je zásadní pro provedení správného návrhu, výroby i následné kontroly kvality produktu. Z tohoto důvodu se provádí různé mechanické zkoušky s využitím působením vnějších sil na materiál, jenž dané vlastnosti umožní zjistit. Provádí se na zkušebních vzorcích materiálu a podmínky konkrétních zkoušek jsou přesně definovány, tak aby bylo zajištěno, že výsledky měření mezi sebou budou srovnatelné. Tyto zkoušky lze blíže rozlišit na zkoušky statické, dynamické a únavové (cyklické). Pryže jsou složité materiály s unikátní kombinací vlastností a s nepřeberně velkým množstvím odlišných gumárenských směsí, a i proto je zkoušení elastomerních materiálů značně složité a nestačí na ně použití standardních metod zkoušení. Aby bylo možno přesně určit materiálové konstanty pro dané nelineární hyperelastické materiály, je nutno je zkoušet na jednoosý tah, dvouosý tah a čistý smyk. Výsledkem těchto zkoušek je poté celá křivka závislosti napětí a deformace pro konkrétní typ zatěžování. [37; 38; 39]

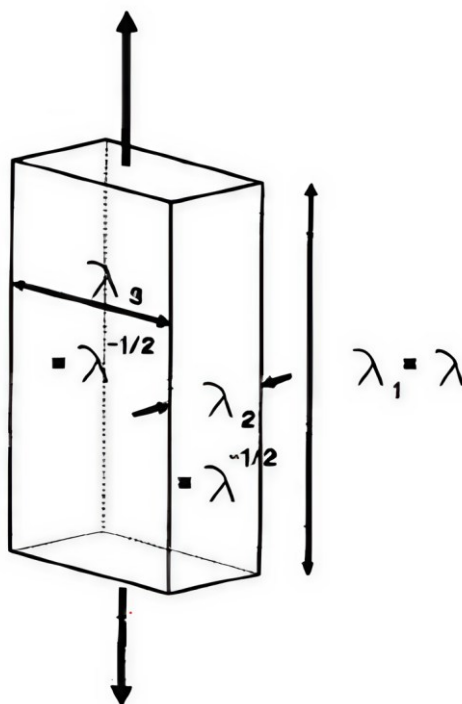
3.3.1 Jednoosá napjatost

Jednoosá napjatost označuje stav, při němž je zkušební těleso zatěžováno pouze ve směru jedné osy. Nejčastěji jde o zkoušky tahem, přičemž v některých případech se bere v potaz i vliv teploty. Tento stav se popisuje poměrným protažením. Tento vztah vychází z předpokladu tzv. objemové nestlačitelnosti, což znamená že se při deformaci nemění objem zkoušeného tělesa, tudíž platí že $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = 1$. Boční strany vzorku nejsou nijak zatěžovány a z toho důvodu je napětí v příčných směrech nulové, tedy $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. V tomto případě je tedy použita rovnice skutečného napětí t . Ta je ve tvaru:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \quad (22)$$

Zde je měrná deformační energie W , a I jsou deformační invarianty. [40; 41]

Tahové zkoušky musí mít přesně stanovené podmínky měření. Tyto podmínky u nás stanovuje norma ISO 37 a jedná se o rozměry a tvar standardizovaného zkušební vzorku, teplotu, čas zkoušky, způsob zatížení anebo čas nutný pro zotavení vzorku. Tyto zkoušky se řadí mezi statické a jsou uskutečňovány na trhačích strojích. Zkušební tělísko je postupně zatěžováno rostoucí silou působící v opačných směrech, přičemž je deformováno stejnou rychlostí. Během měření jsou sledovány důležité fyzikální veličiny jako je napětí a poměrné prodloužení. [37; 40; 41]



Obrázek 10 Jednoosá napjatost

(zdroj: [37])

Z naměřených hodnot se poté vyhodnocují mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálu, jenž jsou důležité pro další využití v praxi. Jedná se o:

- Smluvní napětí σ [MPa] – Jedná se o podíl síly F [N], jenž působí kolmo k uvažovanému průřezu a původního průřezu S [m²].

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (23)$$

- Poměrné prodloužení ε [%] – Jedná se o poměr změny délky ($\Delta l = l - l_0$) k původní délce l_0 .

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (24)$$

- Tažnost ε_p [%] – Jedná se o poměrné prodloužení, jenž je v okamžiku přetržení.

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (25)$$

Dle typu a kvality elastomerního materiálu stanovujeme jeho modul, tedy napětí odpovídající určitému prodloužení. Modul má stejně jako pevnost jednoty MPa a je za každých okolností počítán z původního průřezu. Pro elastomerní materiály s tažností do

400 % je modul měřen při poměrných prodlouženích 50 %, 100 % a 300 %. U elastomerních materiálů s tažností do 750 % je modul měřen při 100 %, 300 % a 500% prodloužení. U elastomeru s tažností nad 750 % je modul měřen při prodloužení 300 %, 500 % a 700 %. [40; 41]

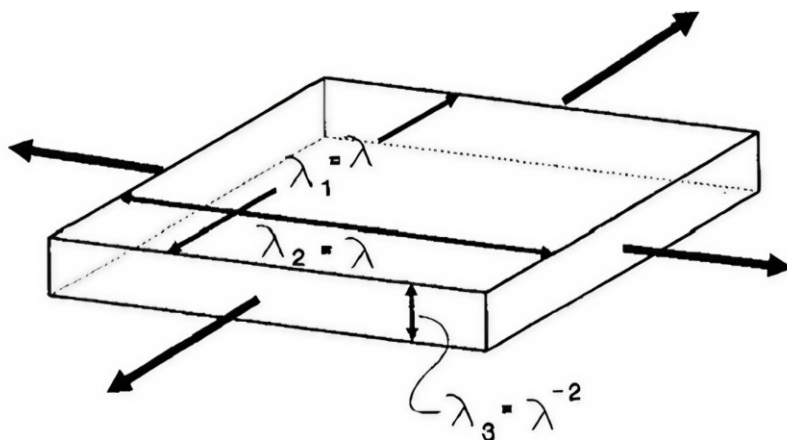
3.3.2 Dvouosá napjatost

Dvouosá napjatost je stav, při němž je zkušební tělísko současně zatěžováno ve dvou směrech. Poměrné protažení je v tomto případě definováno jako $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = \lambda^{-1/2}$. Napětí ve třetím směru σ_3 je nulové, jelikož v tomto směru není zkušební vzorek nijak zatěžován. Skutečné napětí je zde definováno rovnicí:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) \quad (26)$$

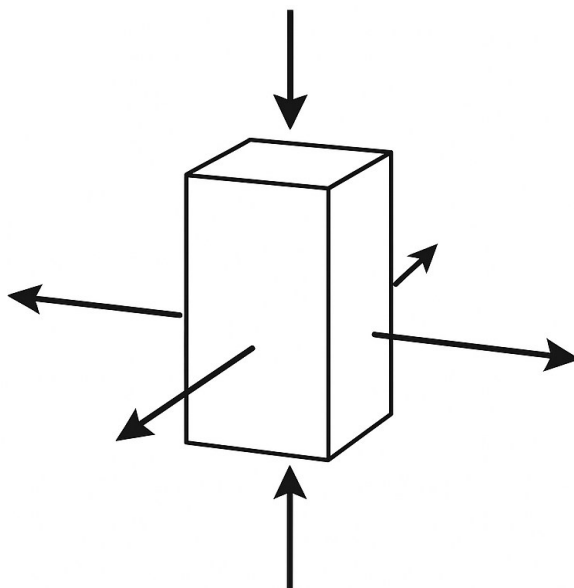
Zde je měrná deformační energie W , a I jsou deformační invarianty. [40; 41]

Během zkoušky dvouosým zatížením je zkušební těleso namáháno ve všech směrech roviny. Stejných deformací lze dosáhnout i při jednoosém tlaku. Existuje hned několik metod realizace tohoto měření. Jednou z možností je roztážení čtvercového vzorku pomocí sil působících ve dvou vzájemně kolmých směrech. Další je roztahování vzorku kruhového tvaru radiálně, tedy směrem od středu ven. V neposlední řadě je možné pomocí stlačeného vzduchu nafouknutí plochého zkušebního vzorku. Tato metoda je konstrukčně nejjednodušší, ale za to může být přesné zaznamenání deformací těžší, hlavně pokud jde o stanovení tloušťky zkušebního vzorku. Z toho důvodu se obvykle využívá předpokladu objemové nestlačitelnosti materiálu. [37; 40; 41]



Obrázek 11 Dvouosá napjatost

(zdroj: [37])



Obrázek 12 Jednoosý tlak jako obdoba dvouosé napjatosti

(zdroj: vlastní)

Při zkoušce se vyhodnocuje:

- Poměrné protažení λ [-] – Jedná se o poměr délky pracovní části l [m] a původní délky l_0 [m].

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (27)$$

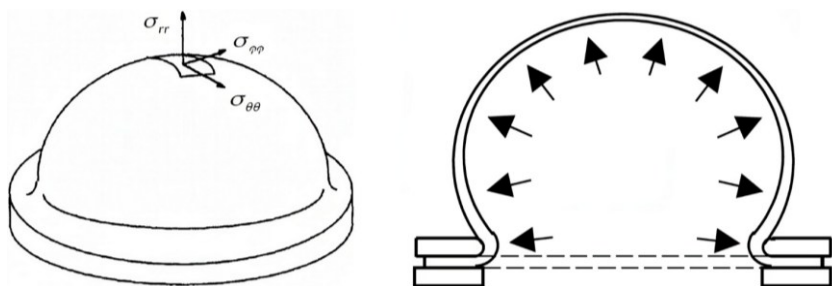
- Tloušťka t [m] – Jedná se o poměr původní tloušťky t_0 [m] a poměrného protažení λ [-].

$$t = \frac{t_0}{\lambda^2} \quad (28)$$

- Napětí σ [MPa] – Zde se v rovnici nachází tlak p [MPa], poloměr r [m], poměrné prodloužení λ [-] a původní tloušťku t_0 [m].

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{2 \cdot t_0} \quad (29)$$

Jedná se tedy o obecnou rovnici membránového napětí, do níž je dosazena původní tloušťka t_0 . [40; 41]



Obrázek 13 Nafukování vzorku při dvouosé napjatosti

(zdroj: [37])

3.3.3 Čistý smyk

Jedná se o stav, při kterém je v jednom směru aplikováno napětí, zatímco ve druhém je zabráněno změně šířky, tudíž $\lambda_2 = 1$. Důležité je že během průběhu deformace hlavní osy napětí nijak nerotují. Typický vzorek má vodorovnou šířku znatelně větší než svislou výšku, a to přibližně desetinásobnou. Poměrné prodloužení je při deformaci $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = \lambda^{-1}$ a napětí σ_3 je nulové. [37; 40; 41]

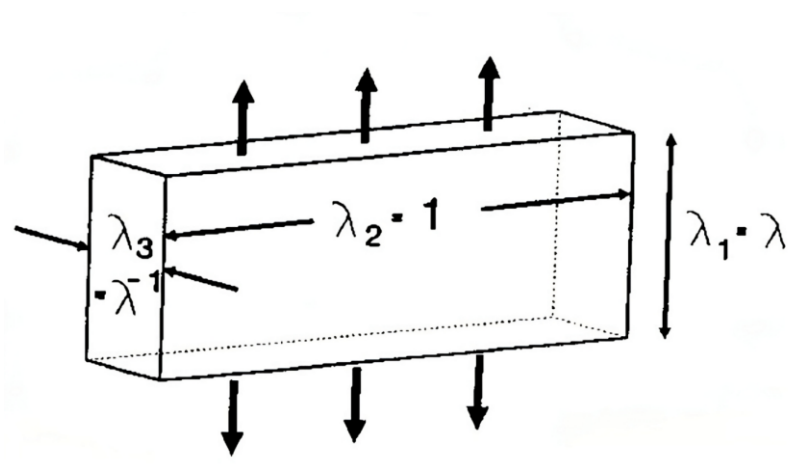
Skutečné napětí ve směru protahování t udává rovnice:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (30)$$

Skutečné napětí vedlejší t_2 udává rovnice:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (31)$$

V praxi se tato zkouška může podobat té tahové. [37; 40; 41]



Obrázek 14 Čistý smyk

(zdroj: [37])

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo porovnat různé metody zkoušení daného elastomerního materiálu. Jeho vlastnosti byly zjišťovány prostřednictvím dvou typů mechanických zkoušek. Konkrétně se jednalo o tlakovou zkoušku a zkoušku dvouosé napjatosti, jež byla provedena nafukováním zkoumaného vzorku. Na základě těchto měření byla vyhodnocena závislost napětí na poměrné deformaci vzorku.

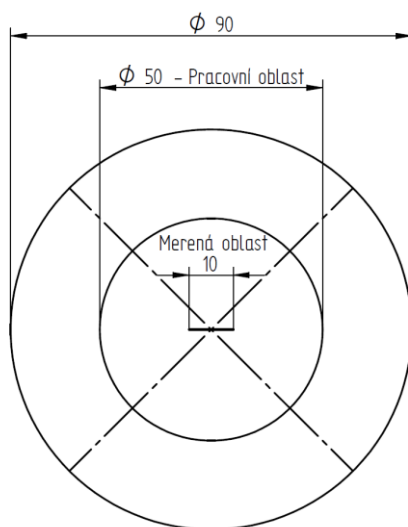
4.1 Zkoušený materiál

Jde o směs kaučuků NR + SBR s obsahem sazí 54 dsk.

4.2 Zkouška dvouosé napjatosti

4.2.1 Zkušební tělesa

Vysekávacím nožem kruhového tvaru o průměru 90 mm bylo z čtvercového polotovaru pomocí ručního lisu vystřiženo 10 zkušebních těles. Samotná testovaná plocha pak měla po upnutí do zkušebního zařízení průměr 50 mm. Na povrchu zkušebního tělesa byl bílým fixem nanesen osový kříž a pro usnadnění sledování deformace skvrnitý vzor. Vzor byl prvně vytvořen nanesením a rozprášením bílého spreje, později však bylo užito bílého fixu, kterým bylo na povrch nanесeno malé množství drobných teček. Na ty byly poté v systému Mercury RT umístěny tři body za účelem měření deformace. Počáteční vzdálenost krajních bodů byla 10 mm.



Obrázek 15 Schéma zkušebního tělesa pro test dvouosé napjatosti

(zdroj: vlastní)

4.2.2 Podmínky měření

Průběh měření byl realizován při teplotě 24 °C a za laboratorních podmínek.

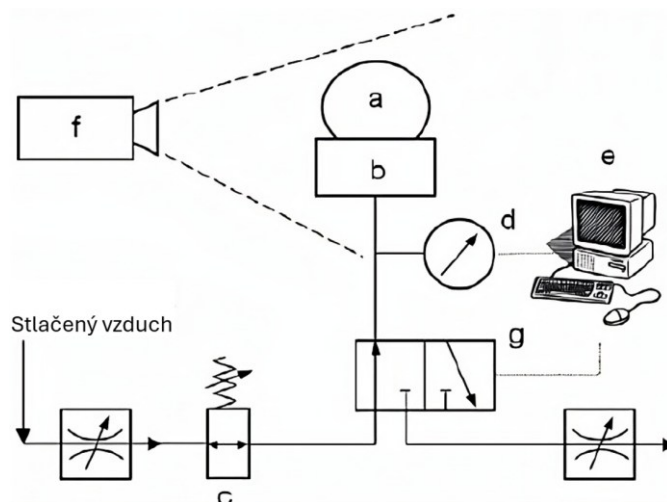
4.2.3 Zkušební zařízení

Pro provedení zkoušky dvouosé napjatosti bylo použito speciálního zařízení, jenž bylo sestaveno pro tuto konkrétní zkoušku. Zde je zkušební těleso upnuto mezi dva prstence, které jsou následně zaaretovány šesti šrouby a z jedné strany je pod tlakem vháněn stlačený vzduch. Ten způsobuje postupné nafukování upnutého zkušebního tělesa. Následný průběh deformace je sledován a zaznamenáván dvěma kamerami, jejichž výstupy jsou v počítači zpracovány pomocí systému Mercury RT. Tlak je měřen pomocí tlakoměru a poté zaznamenán také pomocí Mercury RT systému.

Tabulka 1 Informace o zkušebním zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti

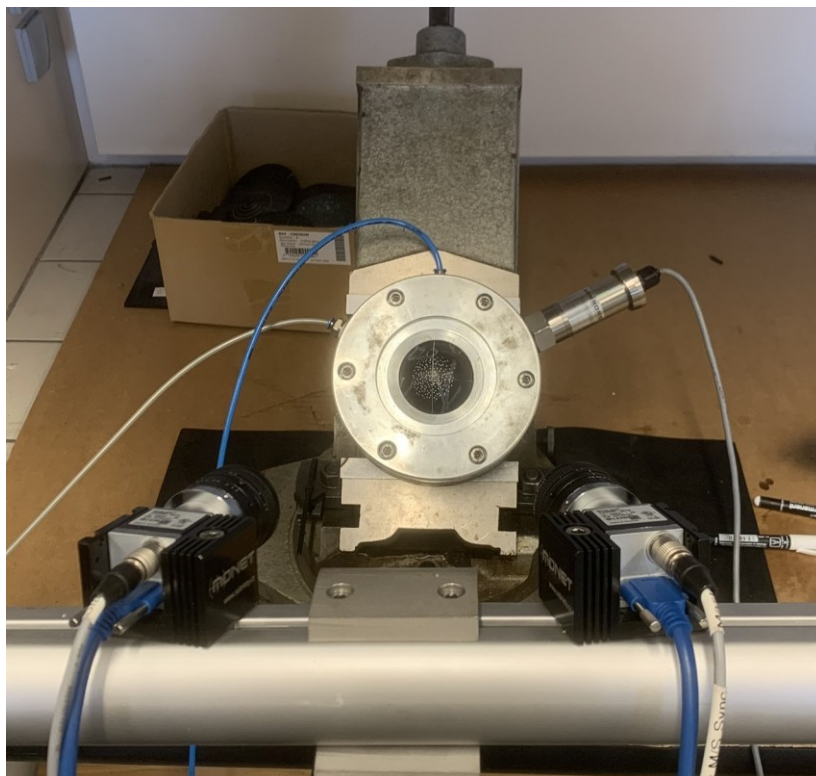
Použitý systém	Mercury RT
Kamery	Basler
Pracovní rozlišení kamer	5 MPx
Tlakoměr	BD Sensors DMP 33 li
Rozsah tlakoměru	0 až 6 bar
Přesnost tlakoměru	0,125 % FSO

(zdroj: vlastní)



Obrázek 16 Schéma zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti

(zdroj: [42])

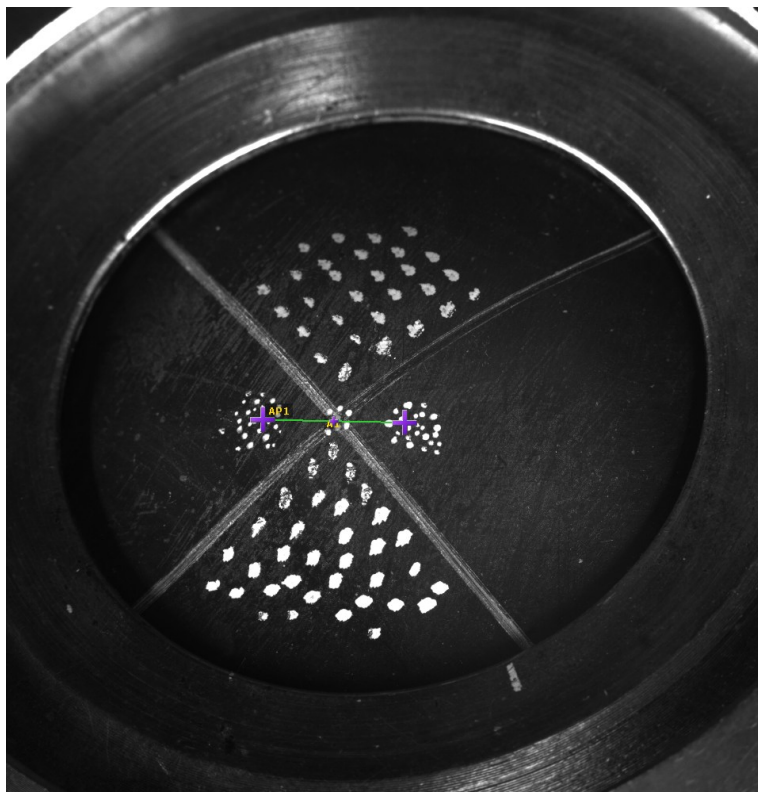


Obrázek 17 Nastavení kamer a upevnění tělesa pro zkoušku dvouosé napjatosti

(zdroj: vlastní)

4.2.4 Postup měření

1. V první řadě bylo z daného materiálu vystřihovacím nožem v ručním lisu vystřiženo 10 kusů zkušebních těles.
2. Na každém zkušebním tělese byl bílým fixem nakreslen osový kříž a poté menší množství malých bílých teček.
3. Zkušební těleso bylo upnuto mezi dva prstence do zkušebního zařízení.
4. Kamery byly nastaveny, zaostřeny, nasvíceny a následně zkalibrovány pomocí kalibrační destičky tak, aby snímaly celý průběh provedené zkoušky.
5. V počítačovém systému Mercury RT byl zvolen měřicí režim a spuštěna zkouška. Na zkušebním tělese byly nastaveny tři body tvořící trojúhelník. Z těchto bodů byl následně spočítán poloměr opsané kružnice a délka oblouku opsané kružnice.
6. Pomocí regulace tlaku bylo zkušební těleso postupně pomalu nafukováno až do dosažení 40 % poměrného prodloužení. Poté bylo zkušební těleso pomalu vyfukováno.
7. Následně bylo zkušební těleso vyjmuto a postup opakován pro zbylé zkušební tělesa.



Obrázek 18 Nastavení třech bodů v systému Mercury RT

(zdroj: vlastní)



Obrázek 19 Zkušební těleso během nafukování

(zdroj: vlastní)

4.2.5 Zpracování výsledků

Zpracování výsledků bylo provedeno v souladu s teoretickými poznatky popsány v kapitole 3.3.2. V systému Mercury RT byly zavedeny vzorce pro výpočet napětí a poměrného prodloužení. Na jejich základě byly z naměřených dat vypočteny potřebné hodnoty. Tyto výsledky byly poté následně uspořádány do tabulek a grafů, které zachycují závislost napětí na poměrné deformaci.

4.3 Zkouška tlakem

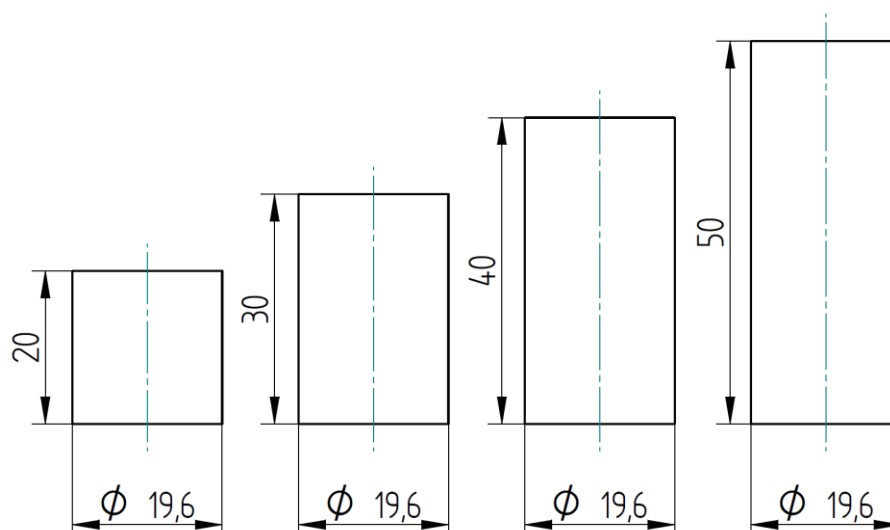
4.3.1 Zkušební tělesa

Pomocí odlamovacího technického nože bylo z válcového polotovaru nařezáno 20 zkušebních těles. Zkušební tělesa byla nařezána v délkách 20 mm, 30 mm, 40 mm a 50 mm a každé délce odpovídalo 5 kusů zkušebních těles. Všechna zkušební tělesa byla průměru 19,6 mm. Na zkušební tělesa byla poté bílým fixem ve středu vzorku nakreslena krátká čára a malé množství drobných teček. Ty sloužily ke snímání deformace pomocí digitální kamery zkušebního zařízení.

Tabulka 2 Rozměry zkušebních těles pro zkoušku tlakem

Délka zkušebních těles: [mm]	Průměr zkušebních těles: [mm]	Počet zkušebních těles: [ks]
20	19,6	5
30	19,6	5
40	19,6	5
50	19,6	5

(zdroj: vlastní)



Obrázek 20 Schéma zkušebních těles pro zkoušku tlakem

(zdroj: vlastní)

4.3.2 Podmínky měření

Průběh měření byl realizován při teplotě 24 °C a za laboratorních podmínek.

4.3.3 Zkušební zařízení

K této zkoušce bylo použito zkušební zařízení SHIMADZU AGS, které splňuje požadavky normy ISO 7500-1 pro třídu 1.

Tabulka 3 Informace o zkušebním zařízení pro zkoušku tlakem

Název zařízení	SHIMADZU AGS – 50kNXXD
Použitý systém	TRAPEZIUM
Rozsah zdvihu příčnicku	0 mm až 1000 mm
Rozsah rychlosti příčnicku	0,001 mm/min až 1600 mm/min
Šířka pracovního prostoru zařízení	425 mm
Maximální síla zařízení	50 kN
Přesnost zařízení	± 1 % indikované síly

(zdroj: vlastní)



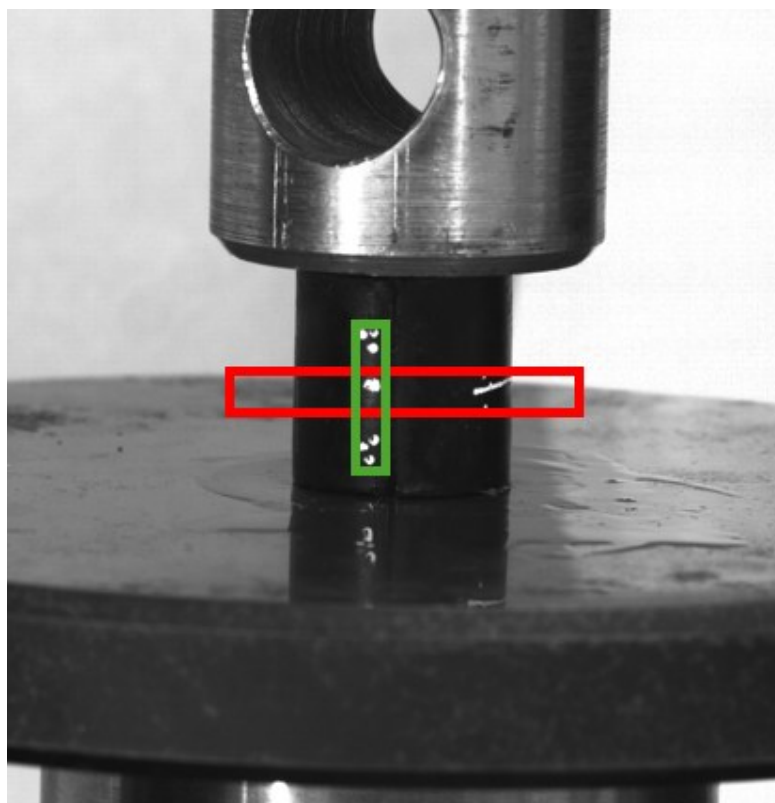
Obrázek 21 Zkušební zařízení SHIMADZU

(zdroj: vlastní)

4.3.4 Postup měření

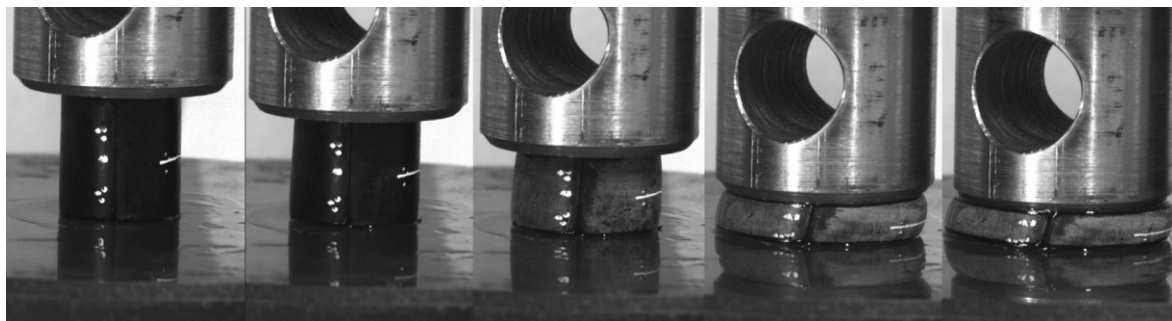
1. V první řadě bylo z daného materiálu nařezáno 20 kusů zkušebních těles příslušných délek (viz. Kapitola 4.3.1.).
2. V systému TRAPEZIUM byl nastaven druh zkoušky a odpovídající metoda měření.
3. Poté byl na zkušební těleso nanesen silikonový olej pro zlepšení kluzných vlastností a zkušební těleso bylo vloženo mezi čelisti zkušebního stroje.

4. V systému TRAPEZIUM byly nastaveny oblasti sledované deformace. Pomocí nich byl sledován a vyhodnocován průběh deformace, zkrácení a roztažení zkušební tělesa.
5. Následně byl spuštěn test, při němž se zkušební těleso stlačovalo stálou rychlostí do maximálního možného stlačení.
6. Po dosažení maximálního možného stlačení (nebo dokud nebylo zkušební těleso vytlačeno z čelistí zkušebního zařízení) byl test ručně ukončen.
7. Následně bylo zkušební těleso vyjmuto a postup byl opakován pro zbylá zkušební tělesa.



Obrázek 22 Nastavení oblastí deformace v softwaru TRAPEZIUM

(zdroj: vlastní)



Obrázek 23 Průběh deformace zkušebního tělesa

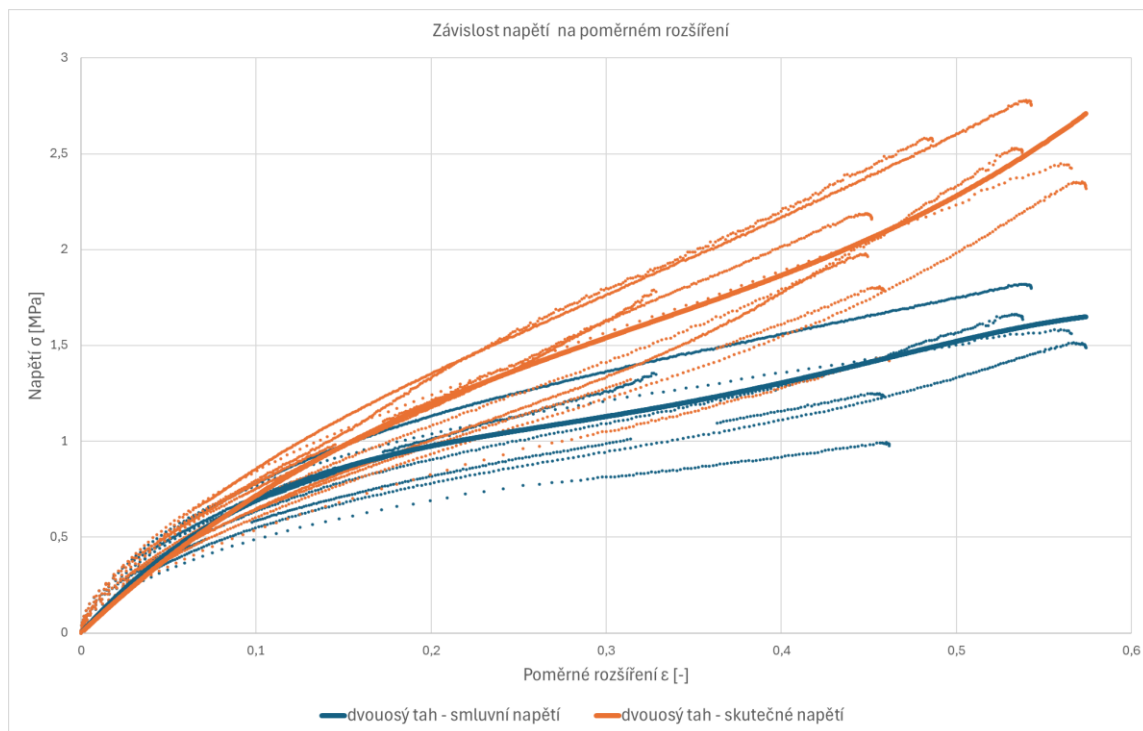
(zdroj: vlastní)

4.3.5 Zpracování výsledků

Zpracování výsledků bylo provedeno v souladu s teoretickými poznatky popsanými v kapitole 3.3.1. V systému TRAPEZIUM byly vypočteny potřebné hodnoty. Tyto výsledky byly následně uspořádány do příslušných tabulek a grafů, které zachycují závislost napětí na poměrné deformaci.

5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

5.1 Zkouška dvouosé napjatosti

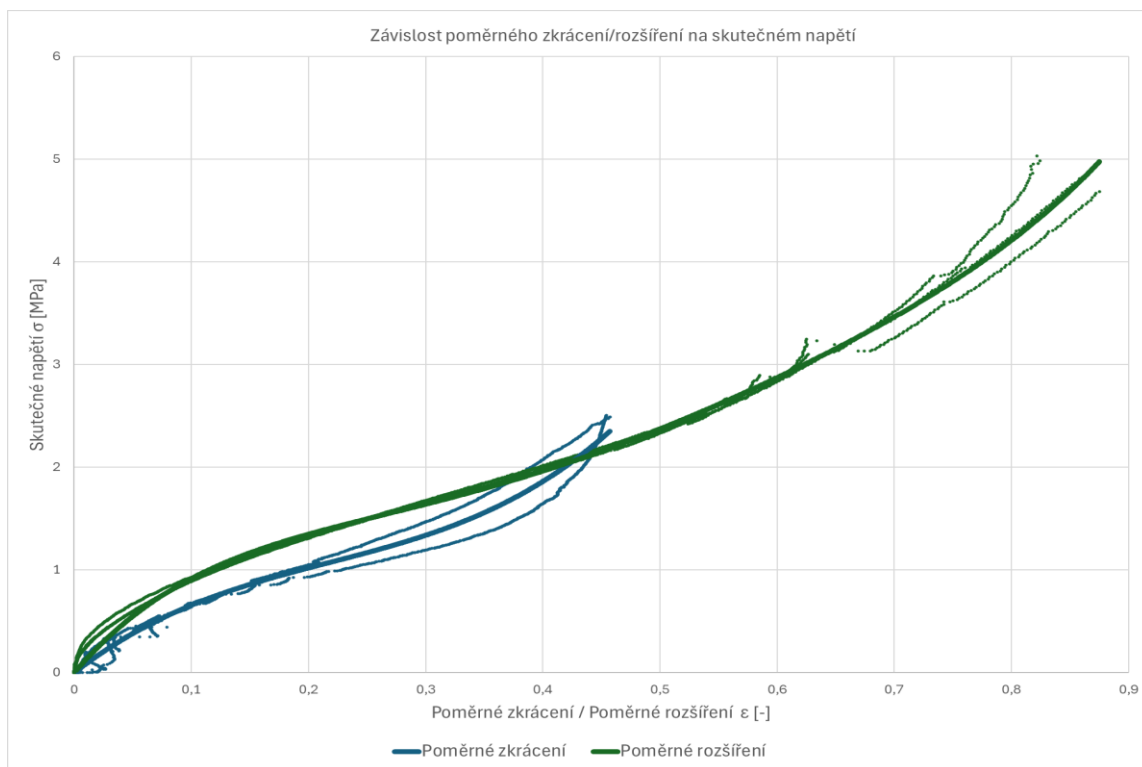


Obrázek 24 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvojmosou napjatost

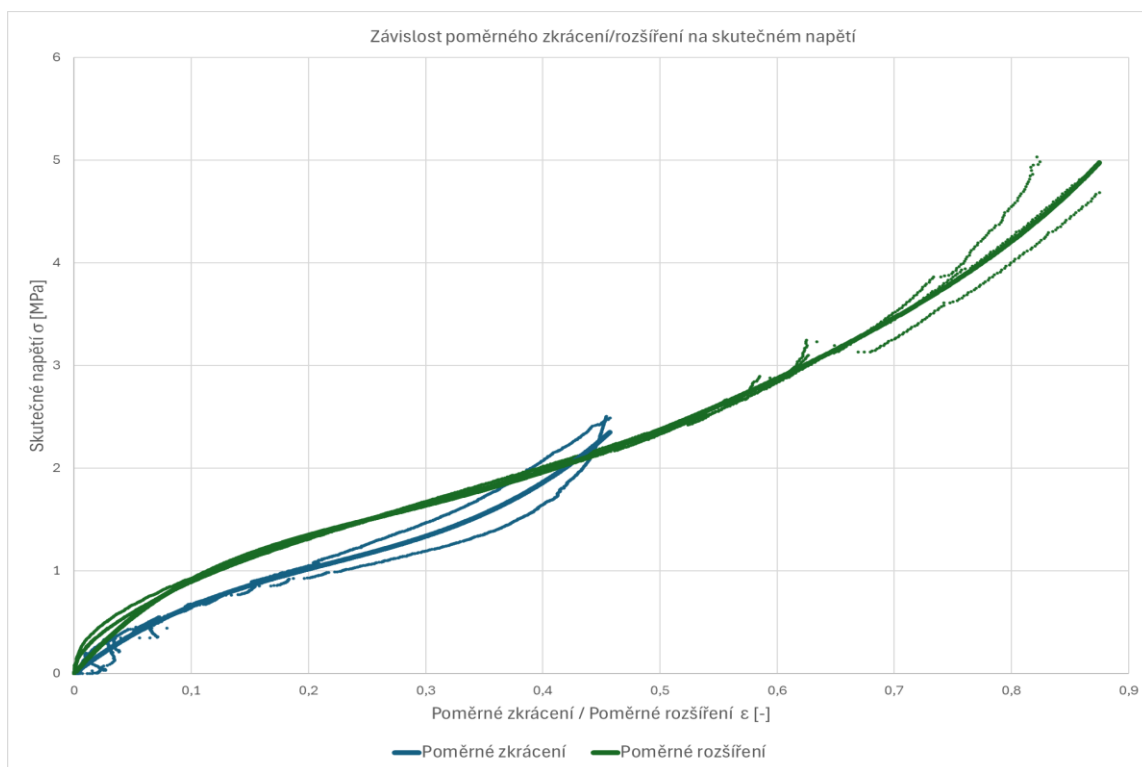
Tabulka 4 Naměřené hodnoty napětí pro dvouosou napjatost

Napětí σ při poměrném roztažení $\varepsilon = 40 \%$ [MPa]			
Druh napětí	Minimum	Medián	Maximum
Skutečné napětí	1,268	1,824	2,220
Smluvní napětí	0,915	1,309	1,594
Napětí σ při poměrném roztažení $\varepsilon = 10 \%$ [MPa]			
Druh napětí	Minimum	Medián	Maximum
Skutečné napětí	0,535	0,759	0,882
Smluvní napětí	0,488	0,692	0,801

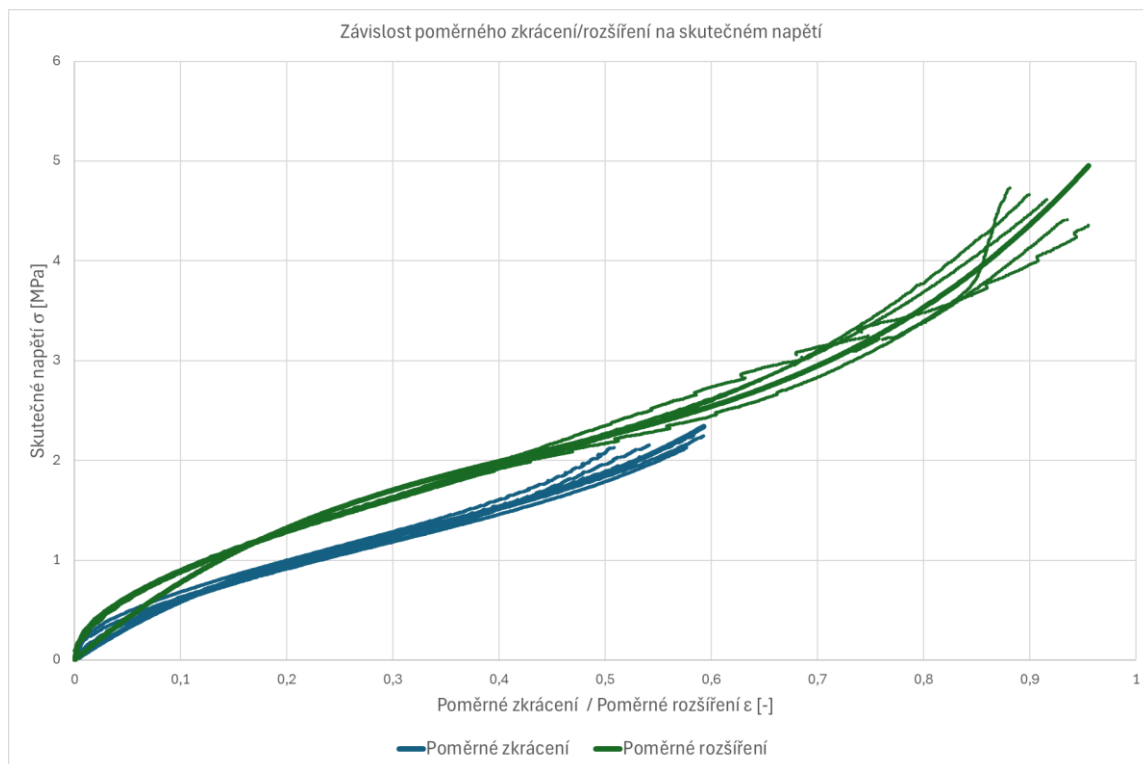
5.2 Tlaková zkouška



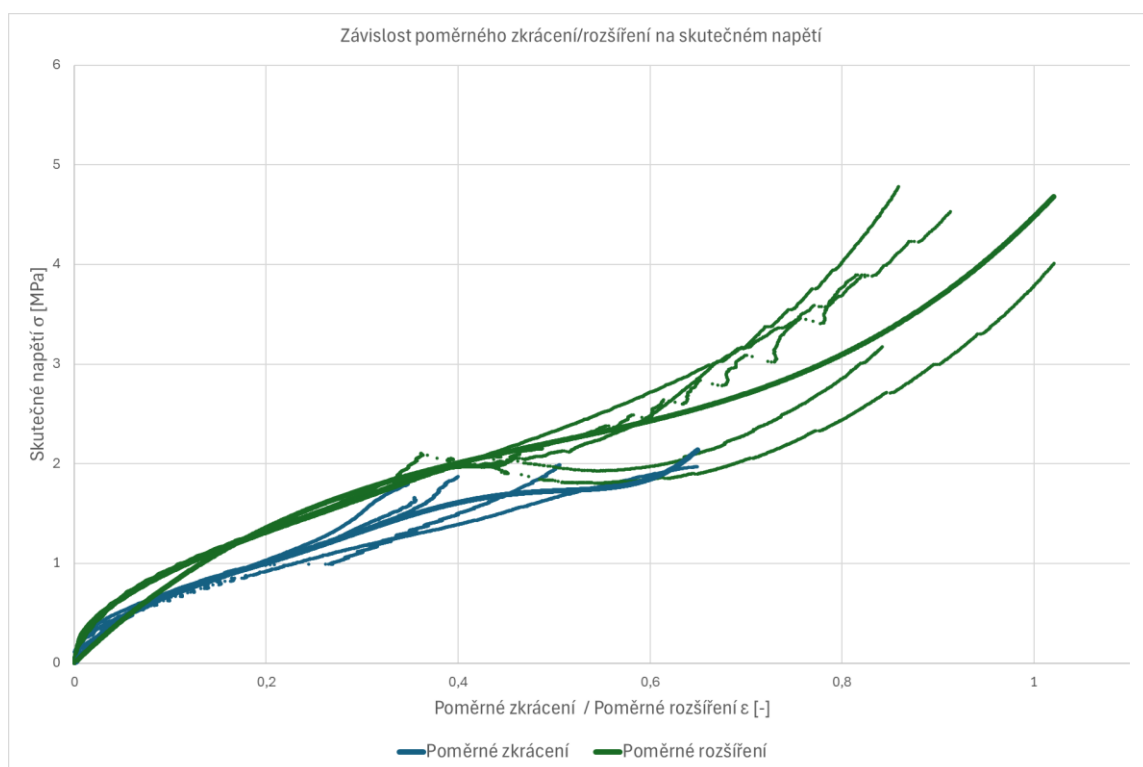
Obrázek 25 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 20 mm



Obrázek 26 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 30 mm



Obrázek 27 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušební tělesa o délce 40 mm



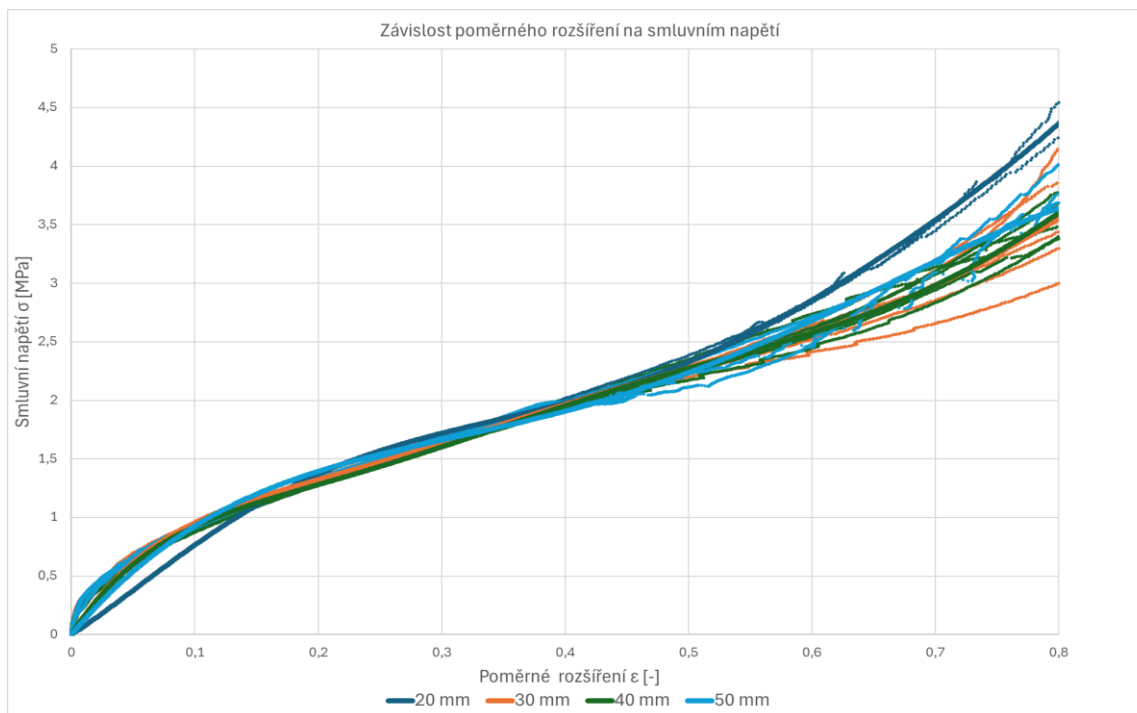
Obrázek 28 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušební tělesa o délce 50 mm

Tabulka 5 Naměřené hodnoty skutečného napětí při rozšíření pro tlakovou zkoušku

Skutečné napětí σ při poměrném rozšíření $\varepsilon = 40 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	1,967	1,989	2,013
30	1,931	1,962	1,984
40	1,913	1,942	1,989
50	1,963	1,972	1,992
Skutečné napětí σ při poměrném rozšíření $\varepsilon = 10 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	0,870	0,898	0,948
30	0,878	0,918	0,975
40	0,860	0,886	0,919
50	0,890	0,933	0,959

Tabulka 6 Naměřené hodnoty skutečného napětí při zkrácení pro tlakovou zkoušku

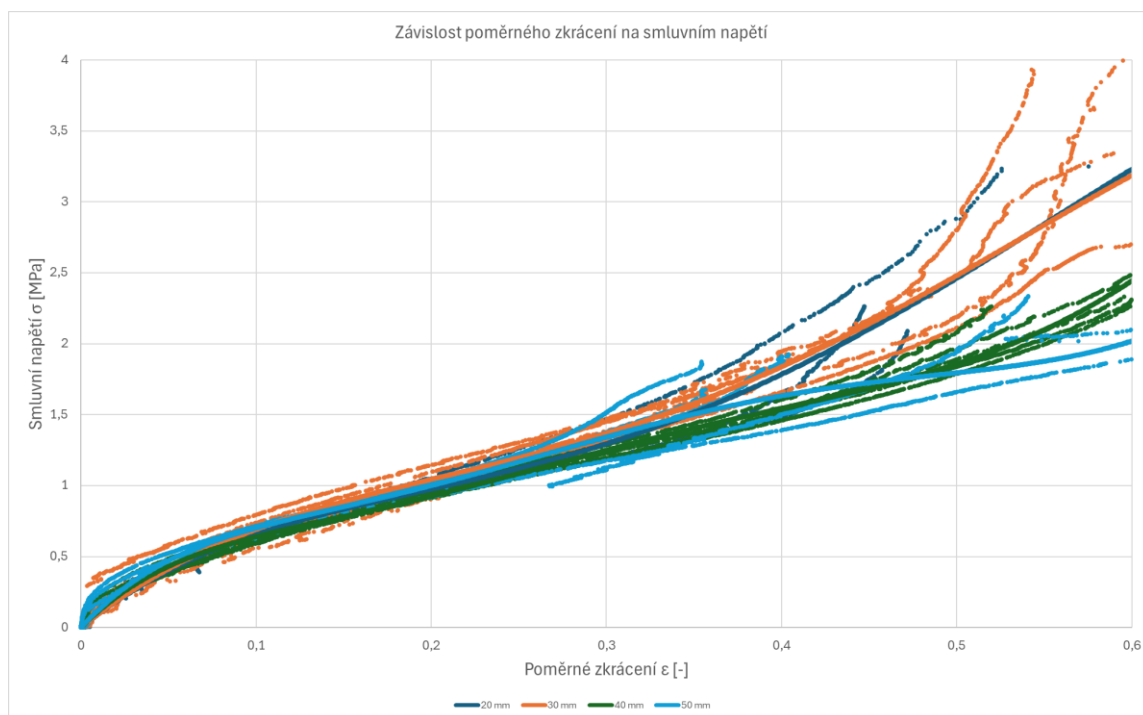
Skutečné napětí σ při poměrném zkrácení $\varepsilon = 40 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	1,603	1,675	2,117
30	1,644	1,741	1,966
40	1,495	1,520	1,563
50	1,838	1,855	1,871
Skutečné napětí σ při poměrném zkrácení $\varepsilon = 10 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	0,615	0,657	0,696
30	0,539	0,650	0,756
40	0,582	0,610	0,648
50	0,657	0,680	0,709



Obrázek 29 Graf závislosti poměrného rozšíření na smluvním napětí pro zkoušku tlakem

Tabulka 7 Naměřené hodnoty smluvního napětí při rozšíření pro tlakovou zkoušku

Smluvní napětí σ při poměrném rozšíření $\varepsilon = 40 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	3,846	3,914	3,937
30	3,779	3,848	3,893
40	3,743	3,784	3,905
50	3,820	3,872	3,909
Smluvní napětí σ při poměrném rozšíření $\varepsilon = 10 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	1,045	1,088	1,155
30	1,059	1,113	1,190
40	1,033	1,076	1,117
50	1,070	1,130	1,168

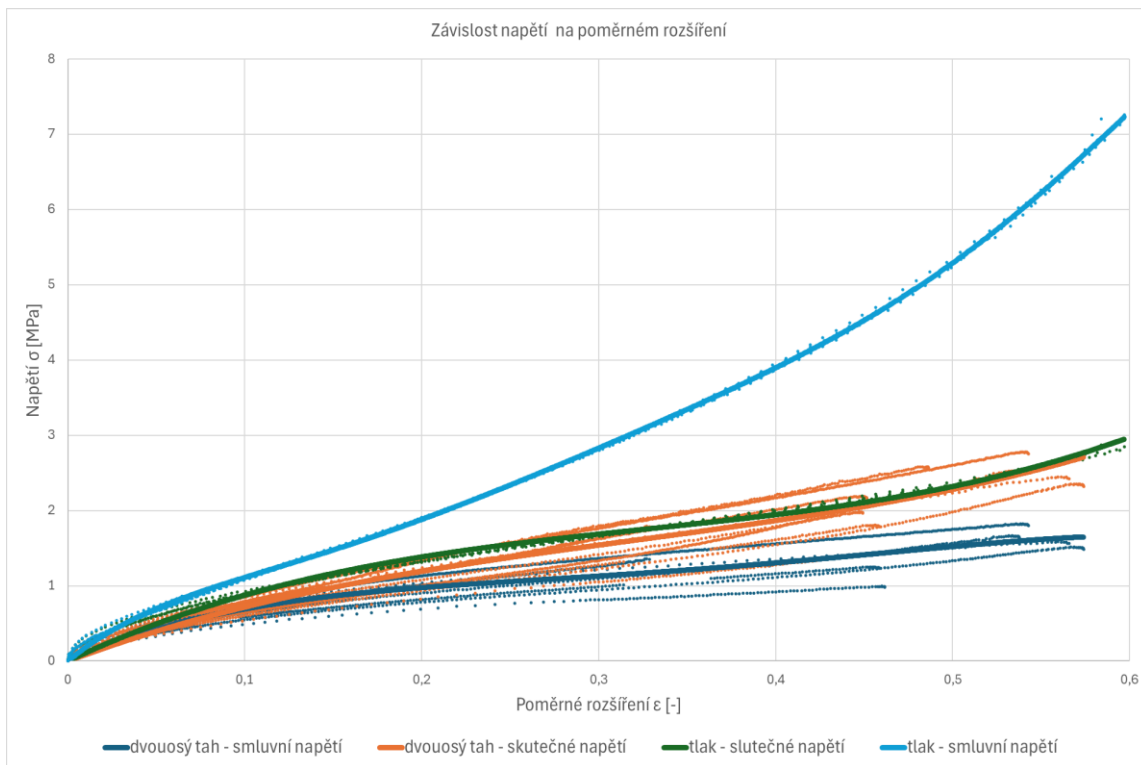


Obrázek 30 Graf závislosti poměrného zkrácení na smluvním napětí pro zkoušku tlakem

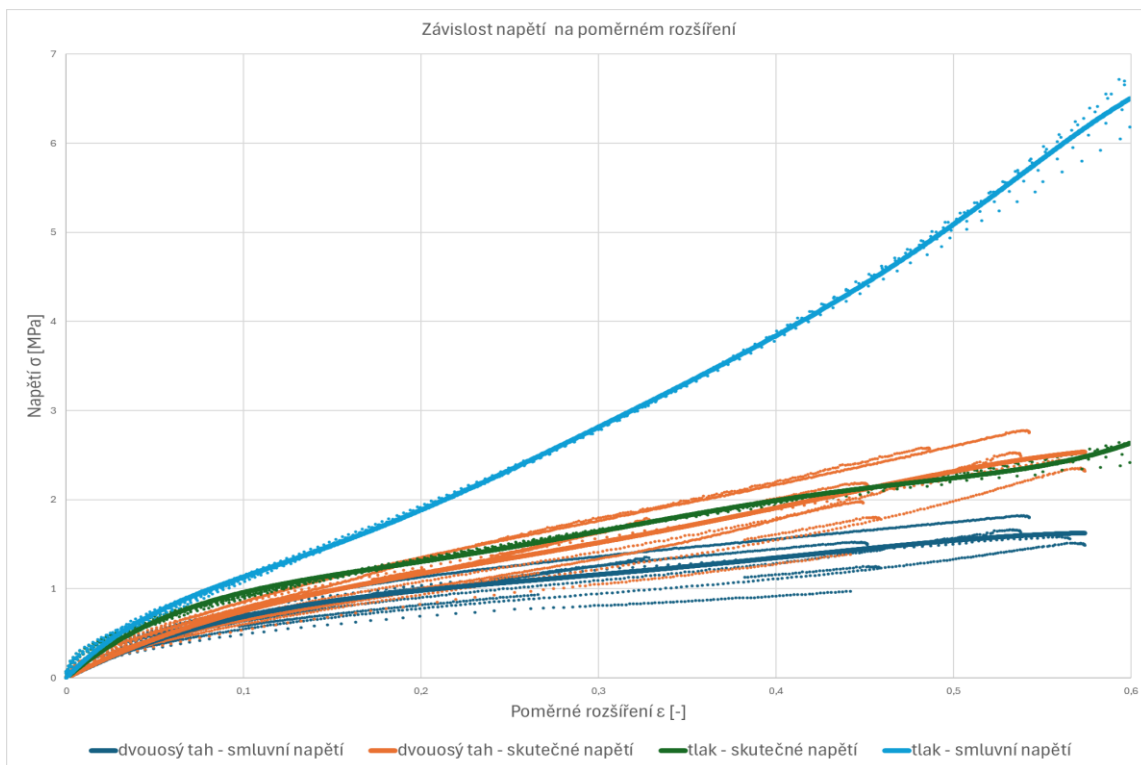
Tabulka 8 Naměřené hodnoty smluvního napětí při zkrácení pro tlakovou zkoušku

Smluvní napětí σ při poměrném zkrácení $\varepsilon = 40 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	2,622	2,826	4,410
30	2,771	3,046	3,905
40	2,368	2,441	2,561
50	3,349	3,401	3,451
Smluvní napětí σ při poměrném zkrácení $\varepsilon = 10 \%$ [MPa]			
Délka zkušebního tělesa [mm]	Minimum	Medián	Maximum
20	0,668	0,729	0,773
30	0,577	0,722	0,851
40	0,636	0,673	0,722
50	0,723	0,753	0,788

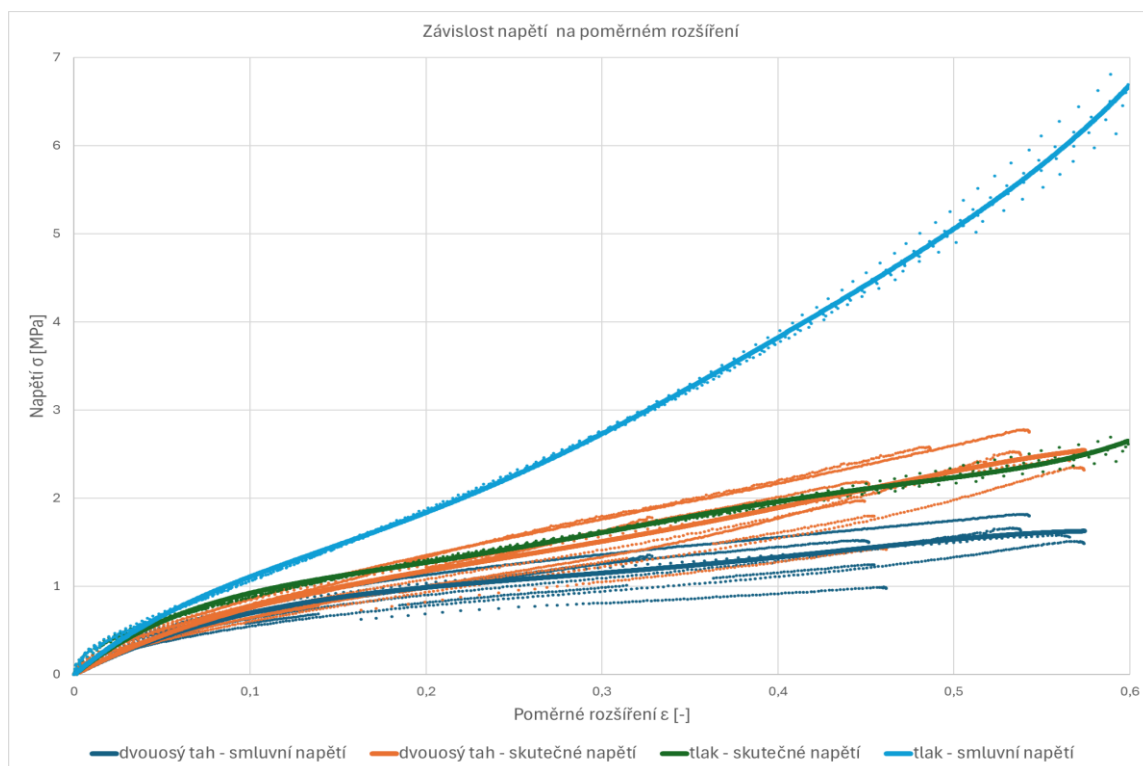
5.3 Srovnání zkoušek



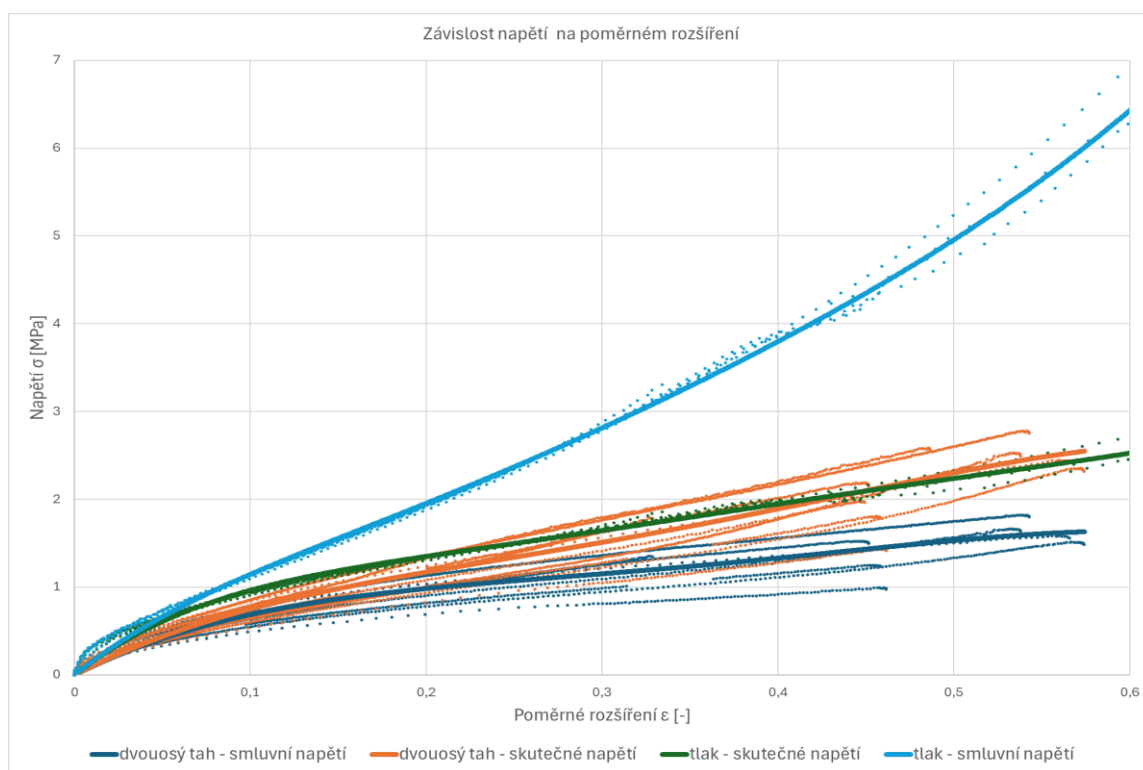
Obrázek 31 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 20 mm



Obrázek 32 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 30 mm



Obrázek 33 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 40 mm



Obrázek 34 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 50 mm

6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Zkoušení elastomerního materiálu bylo provedeno pomocí zkoušky dvouosé napjatosti a dále prostřednictvím tlakové zkoušky na zkušebních tělesech o délkách 20 mm, 30 mm, 40 mm a 50 mm. Významným faktorem v hodnocení byla právě délka zkušebních těles, která měla vliv na dosažené hodnoty napětí.

Při zkoušce dvouosou napjatostí bylo dosaženo mediánu skutečného napětí 1,824 MPa při 40 % poměrném rozšíření. Tato metoda zatěžovala zkušební těleso rovnoměrně vháněným stlačeným vzduchem.

Při tlakové zkoušce vykazovala nejvyšší hodnoty skutečného napětí zkušební tělesa o délce 20 mm. Při 40 % poměrném rozšíření dosáhly mediánu 1,989 MPa a při poměrném zkrácení 1,675 MPa. Krátké zkušební těleso vykazovalo vyšší tuhost, což může být způsobeno omezením deformace okraji čelistí. Hodnoty smluvního napětí byly rovněž nejvyšší ze všech délek, při 40% rozšíření činil medián 3,914 MPa.

Zkušební tělesa o délce 30 mm měla velmi podobný průběh jako zkušební tělesa o délce 20 mm, ale s mírně nižšími hodnotami napětí. Medián skutečného napětí při poměrném rozšíření 40 % činil 1,962 MPa a při poměrném zkrácení 1,741 MPa. Smluvní napětí zůstávalo vysoké, s mediánem 3,848 MPa při 40 % poměrném rozšíření.

Zkušební tělesa o délce 40 mm zaznamenala nejnižší skutečné napětí poměrného zkrácení. Při 40 % poměrném zkrácení byl medián skutečného napětí 1,520 MPa, zatímco při 40 % poměrném rozšíření byla hodnota mediánu skutečného napětí 1,942 MPa, tedy pouze mírně nižší než u kratších zkušebních těles. Tento pokles může souviset s vyšší deformovatelností vyšších zkušebních těles a nižším vlivem krajních efektů. I přes to zůstává průběh křivky velmi blízký ostatním zkušebním tělesům. Medián smluvního napětí při 40 % poměrném rozšíření byl 3,784 MPa.

Zkušební tělesa o délce 50 mm vykazovala mírně vyšší hodnoty skutečného napětí poměrného zkrácení, při 40 % poměrném zkrácení byl medián 1,855 MPa. Během 40 % poměrném rozšíření dosáhlo skutečné napětí mediánu 1,972 MPa, tato hodnota je velmi blízká zkušebním tělesům o délce 20 mm. Výsledky ukazují, že vliv délky tělesa na výsledné napětí není lineární. Vyšší tělesa mohou deformaci rozkládat rovnoměrněji, ale současně se u nich mohou uplatnit jiné napěťové efekty jako je nestabilita nebo vybočení zkušební tělesa. Medián smluvního napětí při 40 % poměrném rozšíření byl 3,872 MPa.

Z hlediska smluvního napětí bylo u všech délek pozorováno vyšší zatížení než při výpočtu skutečného napětí. To je způsobeno faktem, že zatímco smluvní napětí vychází z původních geometrických parametrů vzorku, skutečné napětí zohledňuje aktuální, deformovaný stav materiálu, což je u hyperelastických materiálů mnohem přesnější přístup.

Z hlediska tuhosti, měřené skutečným napětím při 40 % poměrném rozšíření, byla nejtuzší zkušební tělesa o délce 20 mm. Nejměkčí byla naopak zkušební tělesa o délce 40 mm.

Při porovnání se zkouškou dvouosé napjatosti je patrné, že všechny délky zkušebních těles vykazovaly velmi podobné průběhy křivek. Nejbližší hodnotám dvouosé napjatosti se přiblížily zkušební tělesa o délce 40 mm. Tyto výsledky ukázaly, že průběh napětí při tlakové zkoušce je velmi podobný průběhu při dvouosém zatížení. Vzhledem k tomu, že tlaková zkouška je konstrukčně jednodušší, naznačují tyto výsledky možnost jejího využití jako náhrady za složitější zkoušku dvouosé napjatosti.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na stanovení mechanických vlastností elastomerů pomocí dvou typů mechanického zatěžování, a to konkrétně tlakové zkoušky a zkoušky dvouosé napjatosti. Cílem práce bylo porovnat výsledky získané těmito metodami a posoudit jejich vhodnost pro charakterizaci hyperelastických materiálů.

V teoretické části byly podrobně popsány vlastnosti elastomerů, složení kaučukových směsí, principy hyperelasticity a přehled běžně používaných hyperelastických modelů.

V praktické části byla realizována experimentální měření na zkušebních tělesech ze směsi NR + SBR s obsahem sazí 54 dsk. Všechna měření probíhala za laboratorních podmínek při teplotě 24 °C. Při zkoušce dvouosé napjatosti bylo těleso deformováno pomocí stlačeného vzduchu, zatímco při tlakové zkoušce bylo zatěžováno přímým stlačením pomocí zařízení SHIMADZU AGS. Naměřená data byla zpracována pomocí systémů Mercury RT a TRAPEZIUM a vyhodnocena ve formě tabulek a grafů

Z výsledků vyplývá, že průběhy napětí při tlakové zkoušce vykazovaly velmi podobné charakteristiky jako průběhy při zkoušce dvouosé napjatosti, zejména u zkušebních těles o délce 40 mm. Ty měly také ze všech délek nejnižší hodnoty napětí. Nejvyšší hodnoty napětí pak byly zaznamenány u zkušebních těles o délce 20 mm. Bylo také potvrzeno, že skutečné napětí, které na rozdíl od smluvního napětí zohledňuje aktuální deformovaný stav zkušebního tělesa, poskytuje přesnější popis chování hyperelastických materiálů. Tyto výsledky také naznačují možnost využití jednodušší tlakové zkoušky jako náhrady za složitější zkoušku dvouosé napjatosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CÍDLOVÁ, H.; KOHOUTKOVÁ, B.; KŘIVÁNKOVÁ, P.; ŠTĚPÁNEK, K. a VALOVÁ, B. *HISTORIE CHEMIE*. Online. 2011. Dostupné z: <https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/tov/kaucuk.html>. [cit. 2025-02-17].
- [2] ELEMENT SHOP. *Kaučuk*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.element-shop.cz/slovník-pojmu/kaucuk/?srsltid=AfmBOoqy5LvMDOt8T_c1l1jQgfmjQsUnefN4YDOUrWD_GKgzVU5304o. [cit. 2025-02-17].
- [3] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Online. 15. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/180-polymery>. [cit. 2025-02-17].
- [4] ZHÁNĚLOVÁ, Magdalena. *Kaučuk – přírodní poklad z džungle*. Online. 2019. Dostupné z: <https://gumotexcluny.cz/kaucuk-prirodni-poklad-z-dzungle/>. [cit. 2025-02-17].
- [5] POSPÍŠIL, Ladislav. *NAVRHOVÁNÍ VÝROBKŮ Z PLASTŮ*. Online. 2015. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2015/C3804/PRIRODNI_POLYMERY_MU_4_2_2_015.pdf. [cit. 2025-02-17].
- [6] ŠRŮTEK, Petr. *ZPRACOVÁNÍ KAUCUKU, RUBENA*. Online, Prezentace. Nové Město nad Metují: Střední průmyslová škola, Nové Město nad Metují, 2010. Dostupné z: https://strettech.fs.cvut.cz/2010/sbornik_2010/pdf/1050.pdf. [cit. 2025-02-17].
- [7] NOVOTNÝ, Marek. *Kaučuk*. Online. 2009. Dostupné z: <https://www.izolace.cz/clanky/kaucuk/>. [cit. 2025-02-17].
- [8] VENETI. *Přírodní kaučuk*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.veneti.cz/prirodni-kaucuk>. [cit. 2025-02-17].
- [9] VAŠÍČEK, Emil. *Dělení kaučuků*. Online. 2012. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3454125/>. [cit. 2025-02-18].
- [10] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie 1. Úvod*. Online. 2005. Dostupné z: <https://adoc.pub/gumarenska-technologie.html>. [cit. 2025-02-18].
- [11] VAČÍČEK, Emil. *Syntetické kaučuky*. Online. 2013. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/3661030/#google_vignette. [cit. 2025-02-18].
- [12] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Isoprene*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/isoprene>. [cit. 2025-02-18].
- [13] NETZSCH. *Q: Silicone rubber*. Online. 2024. Dostupné z: <https://analyzing-testing.netzsch.com/de/polymers-netzsch-com/elastomers/hnbr-hydrogenated-acrylonitrile-butadiene-rubber-1>. [cit. 2025-02-19].
- [14] GOTLANDS GUMMIFABRIK AB. *Silicone rubber Q*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.ggf.se/en/rubber-and-silicon/silicone-rubber/>. [cit. 2025-02-19].
- [15] POWER RUBBER SHOP. *Viton® FKM FPM Rubber – Fluorine Rubber*. Online. 2021. Dostupné z: <https://powerrubber.com/en/rubber-compounds/rubber-viton/>. [cit. 2025-02-19].
- [16] FEASSEAL S. R. O. *FPM (VITON)*. Online. 2024. Dostupné z: <https://feasseal.cz/produkty/pryze/pryze-pro-specialni-pouziti/pryze-pro-specialni-pouziti-fpmviteon/>. [cit. 2025-02-19].

- [17] RADO. *FPM*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.rado-rubber.com/specialities/fpm/>. [cit. 2025-02-19].
- [18] XIAMEN XLONG SEAL CO., LTD. *What is CR(Chloroprene rubber)?* Online. 2023. Dostupné z: <https://cz.xlongseals.com/info/what-is-cr-chloroprene-rubber-85365395.html>. [cit. 2025-02-19].
- [19] REHM DICHTUNGEN EHLERS GMBH. *CR Dichtungen*. Online. 2021. Dostupné z: <https://rehmdichtungen.de/werkstoffe-und-materialien/elastomerdichtungen/cr-dichtungen>. [cit. 2025-02-19].
- [20] CLWYD COUMPOUNDERS LTD. *ACM - Polyacrylic Rubber*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.clwydcompounders.com/polymer/acm-rubber/>. [cit. 2025-02-19].
- [21] CEETAK. *Polyacrylate & Ethylene Acrylate Rubber (ACM/AEM)*. Online. 2024. Dostupné z: <https://ceetak.com/materials/aem-acm/>. [cit. 2025-02-19].
- [22] NETZSCH. *NBR: Acrylonitrile-butadiene rubber*. Online. 2024. Dostupné z: <https://analyzing-testing.netzsch.com/de/polymers-netzsch-com/elastomers/nbr-acrylonitrile-butadiene-rubber>. [cit. 2025-02-19].
- [23] OSTAŠ CZ, S.R.O. *NBR pryže (butadien-akrylonitrolový syntetický kaučuk)*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.izolace-tesneni.cz/nbr/>. [cit. 2025-02-19].
- [24] INDUSTRIAL RUBBER GOODS. *Polysulfide Rubber (PSR)*. Online. 2007. Dostupné z: <https://www.industrialrubbergoods.com/polysulfide-rubber.html>. [cit. 2025-02-19].
- [25] MECADI GMBH. *Polysulfide rubber (SR)*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.mecadi.com/en/literature_tools/encyclopedia/categories/elastomer_thermoset/polysulfide_rubber_sr/. [cit. 2025-02-19].
- [26] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie 4. Směsi*. Online. 2005. Dostupné z: <https://adoc.pub/jii-mala-gumarenska-technologie-4-smsi-1-obsah.html>. [cit. 2025-02-19].
- [27] DUCHÁČEK, Vratislav a HRDLIČKA, Zdeněk. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. 4. ed. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [28] RUBENA S. R. O. *Gumárenské směsi*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.rubena.eu/cz/produkty/gumarenske-smesi/>. [cit. 2025-02-19].
- [29] ELEMENT SHOP. *PŘÍSA DY, PLNIVA*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.element-shop.cz/prisady-a-plniva/?srsltid=AfmBOooYcGE8K_w2rEmA26xTbACYK5t-1zQzwEM-atxT8z2pK7xre3eS. [cit. 2025-04-25].
- [30] POLYMER & FILLERS. Online. 2008. Dostupné z: <http://polymer-filler.blogspot.com/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.html>. [cit. 2025-04-25].
- [31] PRINCI, Elisabetta. *Rubber*. Online. Berlin/Boston: DE GRUYTER, 2019. ISBN 978-3-11-064031-1. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/9783110640328>. [cit. 2025-04-25].
- [32] PCC GROUP. *Gumy*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/k/gumy-4/>. [cit. 2025-04-25].
- [33] BORSODCHEM MCHZ. *Gumárenské chemikálie*. Online. 2022. Dostupné z: <https://borsodchem.cz/produkty/gumarenske-chemikalie>. [cit. 2025-05-02].

- [34] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie 5. Procesy*. Online. 2005. Dostupné z: https://docplayer.cz/16222517-Jiri-malac-gumarenska-technologie-5-procesy-1-obsah.html?utm_source=chatgpt.com. [cit. 2025-05-02].
- [35] BOWER, Allan F. *Applied Mechanics of Solids*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 9781439802472.
- [36] KEA-FLEX RUBBER MOULDINGS LTD. *Fundamental properties of elastomers*. Online. 2022. Dostupné z: <https://keaflex.co.uk/materials-data-table/fundamental-properties-of-elastomers/>. [cit. 2025-05-06].
- [37] JAVOŘÍK, Jakub. *HYPERELASTICITA: (učební text)*. PDF. UTB ve Zlíně, 2022.
- [38] BROWN, Roger. *Physical Testing of Rubber*. 4 ed. New York, NY: Springer, 2006. ISBN 0387282866.
- [39] SMETANOVÁ, Anna. *Zkoušky materiálu - rozdělení*. Online. SOŠ a SOU Kuřim, 2025. Dostupné také z: https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/13_Sada_Materialy_2/VY_32_INOVACE_13_04_Zkousky_materialu_rozdeleni.pdf.
- [40] DVOŘÁK, Zdeněk a JAVOŘÍK, Jakub. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2009. ISBN 9788002021551.
- [41] GENT, Alan N. *Engineering with Rubber - How to Design Rubber Components*. Online. 2 ed. Munich: Hanser Publishers, 2001. ISBN 978-3-446-40172-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpERHDRC06/toc?toc-within=simple+tension>. [cit. 2025-05-09].
- [42] JAVOŘÍK, Jakub a MAŇAS, David. *The Specimen Optimization for the Equibiaxial Test of Elastomers*. Online. Department of Production Engineering, Faculty of Technology, 2015. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/261844574_The_specimen_optimization_for_the_equibiaxial_test_of_elastomers.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní rozdělení kaučuků	13
Obrázek 2 Těžba přírodního kaučuku	14
Obrázek 3 Výrobky z kaučuků pro všeobecné použití	15
Obrázek 4 Ukázka fluorouhlíkového kaučuku.....	18
Obrázek 5 Ukázka akrylátového kaučuku	19
Obrázek 6 Ukázka polysulfidového kaučuku	19
Obrázek 7 Přířady kaučukové směsi.....	20
Obrázek 8 Ukázka plniv.....	22
Obrázek 9 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerních materiálů	26
Obrázek 10 Jednoosá napjatost	33
Obrázek 11 Dvouosá napjatost	34
Obrázek 12 Jednoosý tlak jako obdoba dvouosé napjatosti.....	35
Obrázek 13 Nafukování vzorku při dvouosé napjatosti.....	36
Obrázek 14 Čistý smyk.....	36
Obrázek 15 Schéma zkušební tělesa pro test dvouosé napjatosti	38
Obrázek 16 Schéma zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti	39
Obrázek 17 Nastavení kamer a upevnění tělesa pro zkoušku dvouosé napjatosti	40
Obrázek 18 Nastavení třech bodů v systému Mercury RT	41
Obrázek 19 Zkušební těleso během nafukování	41
Obrázek 20 Schéma zkušebních těles pro zkoušku tlakem.....	43
Obrázek 21 Zkušební zařízení SHIMADZU	44
Obrázek 22 Nastavení oblastí deformace v softwaru TRAPEZIUM.....	45
Obrázek 23 Průběh deformace zkušební tělesa.....	46
Obrázek 24 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvojosou napjatost.....	47
Obrázek 25 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušební tělesa o délce 20 mm	48
Obrázek 26 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušební tělesa o délce 30 mm	48
Obrázek 27 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušební tělesa o délce 40 mm	49
Obrázek 28 Graf závislosti poměrného zkrácení/rozšíření na skutečném napětí pro tlakovou zkoušku zkušební tělesa o délce 50 mm	49
Obrázek 29 Graf závislosti poměrného rozšíření na smluvním napětí pro zkoušku tlakem	52
Obrázek 30 Graf závislosti poměrného zkrácení na smluvním napětí pro zkoušku tlakem	53

Obrázek 31 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 20 mm	54
Obrázek 32 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 30 mm	54
Obrázek 33 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 40 mm	55
Obrázek 34 Graf závislosti napětí na poměrném rozšíření pro dvouosou napjatost a tlakovou zkoušku zkušebního tělesa o délce 50 mm	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Informace o zkušebním zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti.....	39
Tabulka 2 Rozměry zkušebních těles pro zkoušku tlakem	42
Tabulka 3 Informace o zkušebním zařízení pro zkoušku tlakem.....	43
Tabulka 4 Naměřené hodnoty napětí pro dvouosou napjatost	47
Tabulka 5 Naměřené hodnoty skutečného napětí při rozšíření pro tlakovou zkoušku	50
Tabulka 6 Naměřené hodnoty skutečného napětí při zkrácení pro tlakovou zkoušku.....	51
Tabulka 7 Naměřené hodnoty smluvního napětí při rozšíření pro tlakovou zkoušku	52
Tabulka 8 Naměřené hodnoty smluvního napětí při zkrácení pro tlakovou zkoušku.....	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NR	[-]	Natural Rubber – přírodní kaučuk
BR	[-]	Butadiene Rubber – butadienový kaučuk
SBR	[-]	Styrene-Butadiene Rubber – butadien-styrenový kaučuk
EPM	[-]	Ethylene-Propylene Rubber – ethylen-propylenový kaučuk
EPDM	[-]	Ethylene-Propylene-Diene Rubber – ethylen-propylen-dienový kaučuk
IR	[-]	Isoprene Rubber – isoprenový kaučuk
CR	[-]	Chloroprene Rubber – chloroprenový kaučuk
ACM	[-]	Acrylate Rubber – akrylátový kaučuk
NBR	[-]	Nitrile Butadiene Rubber – butadien-akrylonitrilový kaučuk
FPM FKM	[-]	Fluoroelastomer – fluorouhlíkový kaučuk
OT	[-]	Polysulfide Rubber – polysulfidový kaučuk
phr	[dílů/100dílů]	Parts per hundred rubber – díly na 100 dílů kaučuku
W	[J·m ⁻³]	Měrná deformační energie
I ₁ , I ₂ , I ₃	[-]	Invarianty deformačního tenzoru
λ	[-]	Poměrné protažení
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	[-]	Hlavní poměrná protažení ve směrech os
σ	[MPa]	Napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MPa]	Napětí v jednotlivých směrech
ε	[%]	Poměrná deformace
ε_p	[%]	Tažnost při přetržení
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu/tlaku

G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
K	[MPa]	Objemový modul pružnosti
ν	[–]	Poissonovo číslo
α	[K ⁻¹]	Součinitel teplotní roztažnosti
p	[MPa]	Tlak
r	[mm]	Poloměr opsané kružnice
t	[mm]	Tloušťka vzorku
t_0	[mm]	Původní tloušťka vzorku
l	[mm]	Délka vzorku
l_0	[mm]	Původní délka vzorku
Δl	[mm]	Změna délky vzorku
F	[N]	Síla působící na vzorek
S	[mm ²]	Plocha průřezu vzorku
T	[K]	Absolutní teplota
μ	[MPa]	Smykový modul
δ_{ij}	[–]	Kroneckerovo delta
S_{ij}	[MPa]	2. Piola-Kirchhoffův tenzor napětí
C_{ij}	[–]	Cauchy-Greenův tenzor deformace