

Vlastností komponentů pro výrobu pneumatik

Petr Rak

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:	Petr Rak
Osobní číslo:	T22560
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vlastnosti komponentů pro výrobu pneumatik

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.
EHRENSTEIN, G.W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia Praha, 2009. ISBN 978-0521841887.
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

Cílem bakalářské práce bylo zkoušení elastomerů vyztužených kordy. Teoretická část práce se zabývá kaučuky, gumárenskými směsi, hyperelasticitou, hyperelastickými modely a taky mechanickými zkouškami zaměřenými na zkoušení elastomerů. V praktické části byli elastomery zkoušeny a výsledky byly zaneseny do grafů.

Klíčová slova: kaučuk, elastomer, hyperelasticita, jednoosá napjatost, dvouosá napjatost, čistý smyk, mechanické zkoušky

ABSTRACT

The aim of the bachelor's thesis was to test cord-reinforced elastomers. The theoretical part of the thesis deals with rubbers, rubber mixtures, hyperelasticity, hyperelastic models and mechanical tests focused on testing elastomers. In the practical part, the elastomers were tested, and the results were entered into graphs.

Keywords: rubber, elastomer, hyperelasticity, uniaxial stress, biaxial stress, pure shear, mechanical testing

Velice rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Jakubu Javoříkovi Ph.D. za jeho trpělivý přístup při vedení práce, cenné rady a připomínky.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KAČUKY	13
1.1 PŘÍRODNÍ KAČUKY (NR).....	13
1.2 SYNTETICKÉ KAČUKY PRO VŠEOBECNÉ POUŽITÍ.....	15
1.2.1 Butadien-styrenový kaučuk (SBR)	15
1.2.2 Butadienový kaučuk (BR).....	16
1.2.3 Isoprenový kaučuk (IR).....	17
1.2.4 Ethylen-propylenové kaučuky (EPM a EPDM).....	17
1.3 SPECIÁLNÍ SYNTETICKÉ KAČUKY	18
1.3.1 Chloroprenový kaučuk (CR).....	19
1.3.2 Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR).....	20
1.3.3 Butylkaučuk (IIR)	21
1.3.4 Akrylátové kaučuky (ACM)	21
1.3.5 Silikonové kaučuky (Q)	22
1.3.6 Fluorokaučuky.....	23
1.4 KAČUKY VYZTUŽENÉ KORDY	23
1.4.1 Kordy.....	24
2 GUMARENSKÉ SMĚSI	25
2.1 PLNIVA.....	25
2.2 ZMĚKČOVADLA	26
2.3 ANTIDEGRADANTY	26
2.4 VULKANIZAČNÍ SYSTÉMY.....	26
2.4.1 Vulkanizační činidla.....	27
2.4.2 Urychlovače	27
2.4.3 Aktivátory, inhibitory.....	27
2.5 ZVLÁŠTNÍ PŘÍSADY.....	27
2.5.1 Plastikační činidla a Nadouvadla	27
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	28
3.1 HYPERELASTICITA.....	28
3.2 MODEL Y.....	31
3.2.1 Polynomická funkce.....	31
3.2.2 Neo-Hookean	31
3.2.3 Yeoh	31
3.2.4 Mooney-Rivlin	32
3.2.5 Arrude-Boyce.....	33
3.2.6 Gent.....	33
3.2.7 Ogden	33

4	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	35
4.1	JEDNOOSÁ NAPIJATOST (TAHOVÁ ZKOUŠKA)	35
4.2	DVOUOSÁ NAPIJATOST (ZKOUŠKA DVOUOSÝM ZATÍŽENÍM).....	36
4.3	ČISTÝ SMYK (SMYKOVÁ ZKOUŠKA)	37
II	PRAKTICKÁ ČÁST	38
5	CÍL PRÁCE	39
5.1	MATERIÁLY	39
5.2	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	43
5.3	POSTUP MĚŘENÍ.....	44
5.4	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	45
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	47
6.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA S PA KORDY	48
6.1.1	Geometrie 1: 40 x 26 mm, úhel 45°	48
6.1.2	Geometrie 2: 40 x 49 mm, úhel 60°	49
6.1.3	Geometrie 3: 40 x 110 mm, úhel 75°	50
6.1.4	Geometrie 4: 27 x 26 mm, úhel 60°	51
6.1.5	Geometrie 5: 17,5 x 26 mm, úhel 75°	52
6.1.6	Geometrie 6: 10 x 26 mm, úhel 90°	53
6.1.7	Geometrie 7: 10 x 110 mm, úhel 90°	53
6.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA S PES KORDY	54
6.2.1	Geometrie 1: 40 x 26 mm, úhel 45°	54
6.2.2	Geometrie 2: 40 x 49 mm, úhel 60°	55
6.2.3	Geometrie 3: 40 x 110 mm, úhel 75°	56
6.2.4	Geometrie 4: 27 x 26 mm, úhel 60°	57
6.2.5	Geometrie 5: 17,5 x 26 mm, úhel 75°	58
6.2.6	Geometrie 6: 10 x 26 mm, úhel 90°	59
6.2.7	Geometrie 7: 10 x 110 mm, úhel 90°	59
6.3	DISKUZE	59
	ZÁVĚR.....	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM TABULEK.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69

ÚVOD

Elastomery jsou součástí velkou skupinou polymerních materiálů, kterých je velké množství. Mají velké využití ve všech odvětvích průmyslu. Základní surovinou pro výrobu elastomerů je kaučuk, který může být přírodní nebo syntetický. Přírodní kaučuk se vyrábí z latexu a syntetický se získává chemickým procesem zvaným polymerace. Kaučuky jsou důležitou částí gumárenských směsí spolu s různými přísadami. Vlastnosti výsledného materiálu záleží na tom, jaké přísady jsou přidány a poté probíhá vulkanizace – síťování.

Hlavní vlastností elastomerních materiálu je to že mohou dosahovat velkých deformací při malém zatížení. Z toho vyplývá že závislost mezi napětím a deformací je silně nelineární, a proto se nedá pro výpočty nedá použít Hookův zákon. Tato vlastnost elastomerů se nazývá hyperelasticita a pro výpočty se používají hyperelastické modely.

Mechanické vlastnosti elastomerních materiálu závisí na použitých přísadách v gumárenských směsích. Toto znamená že elastomery nemusí mít pokaždé stejné vlastnosti, a proto se zjišťují za pomoci mechanických zkoušek. Taky musíme brát v potaz to že mechanické vlastnosti elastomerů jsou ovlivněny teplotou.

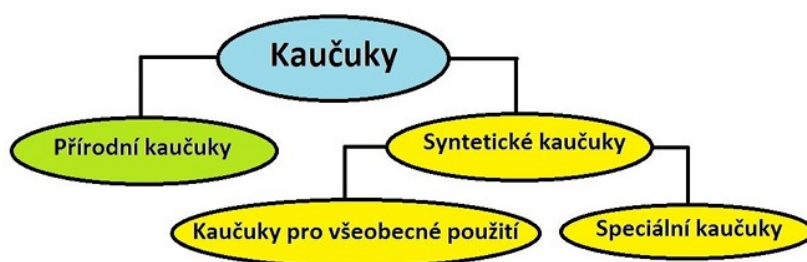
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KAUČUKY

Kaučuky se v Evropě objevily již v 16. století, když evropská expedice v Americe objevila, že místní obyvatelé tento materiál používali pro výrobu různých předmětů a přivezli jej do Evropy.

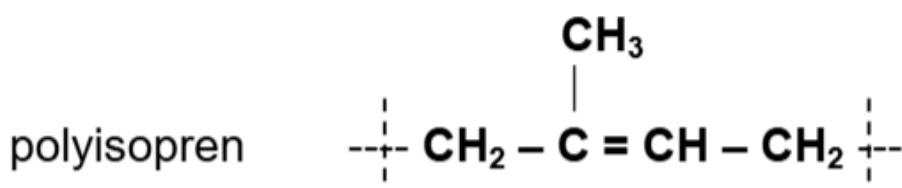
Začaly se více používat v roce 1839, kdy americký chemik Charles Goodyear vynalezl proces vulkanizace kaučuků. Vulkanizace umožnila používat kaučuky v široké škále aplikací. Od té doby se kaučuky začaly používat čím dál víc.

Kaučuky jsou jak přírodní, tak syntetické. Řadí se mezi elastomery. Kaučuk tvoří dlouhé, navzájem propletené makromolekulární řetězce, které se snadno deformují již při malém zatížení a jakmile přestane síla působit, vrací se materiál do původního stavu – tato vlastnost se označuje jako pružnost (elastická) [1, 2, 3, 4]



Obrázek 1 Rozdělení kaučuků

1.1 Přírodní kaučuky (NR)



Obrázek 2 Chemický vzorec polyisoprenu [1]

Řada rostlin obsahuje mléčně zbarvenou mizu, která se nazývá latex. Pro gumárenské aplikace se většinou používá latex z plantáží stromů *Hevea brasiliensis* (kaučukovník brazilský). Čerstvý latex je koloidní disperze cis-1,4 polyisoprenu ve vodném mediu zvaném sérum. Příprava NR začíná na plantážích čepováním latexu, který může být dále zpracován různými postupy.

Nejčastěji se používá koagulace kyselinou mravenčí nebo octovou a získají se typy: Ribbed Smoked Sheets (RSS), Air Dried Sheets (ADS), Technically Specified Rubber (jako je TSR L, TSR CV a TSR WF) a světlá krepa.

Další způsob zpracování latexu je samovolným bakteriálním rozkladem latexu roste jeho kyselost a dochází k postupné koagulaci. Tento postup se používá např. pro typy: TSR 10, TSR 20 a hnědá krepa.

Řada speciálních typů NR se získává modifikací načepovaného latexu před jeho dalším zpracováním. Úpravou NR solemi hydroxylaminu se zvýší odolnost NR proti tvrdnutí během skladování.

Většina dodávaných typů NR má v důsledku vysoké molekulové hmotnosti vysokou viskozitu a musí být před zpracováním nejprve upravena plastikací (tj. mechanickým odbouráním). Po plastikaci mají směsi s NR obvykle dobré zpracovatelské vlastnosti, dobrou pevnost před vulkanizací, vysokou konfekční lepivost a vysokou rychlost vulkanizace.

Vulkanizáty z NR mají vysokou mechanickou pevnost, vysokou elasticitu a velmi dobrou odolnost proti oděru. Vykazují velmi dobré dynamické vlastnosti a jsou proto často používány v pneumatikách, pružinách a vibračních uloženích. Přídavek sazí zvyšuje odolnost proti UV-záření. [1, 2, 3, 4]

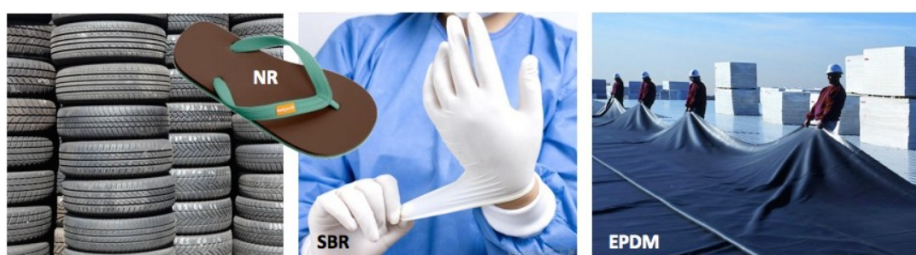


Obrázek 3 *Hevea brasiliensis*
(kaučukovník brazilský) [5]

1.2 Syntetické kaučuky pro všeobecné použití

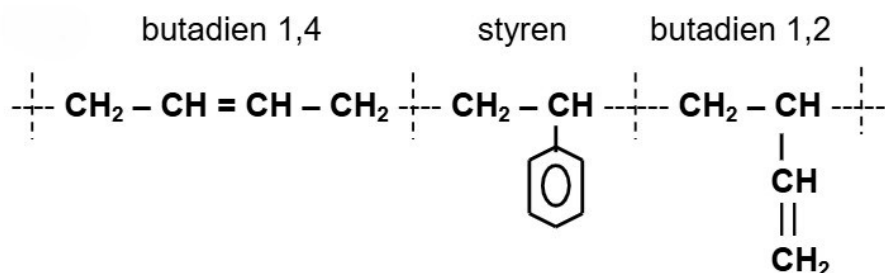
Zkratka	Název	Poznámka
NR	Přírodní kaučuk	V hlavním řetězci makromolekul obsahují dvojné vazby, proto k jejich vulkanizaci používáme nejčastěji síru. Na druhou stranu vzhledem k těmto dvojným vazbám vyžadují ochranu proti degradaci .
BR	Butadienový kaučuk	
SBR	Butadien-styrenový kaučuk	
IR	Isoprenový kaučuk	
EPM	Ethylen-propylenový kaučuk	EPM neobsahuje dvojné vazby vůbec, EPDM jen výhradně v bočních řetězcích. Proto jsou výborně odolné proti stárnutí .
EPDM	Ethylen-propylen-dién-terpolymerový kaučuk	

Obrázek 4 Tabulka nejčastěji používaných kaučuků [6]



Obrázek 5 Výrobky z kaučuků [6]

1.2.1 Butadien-styrenový kaučuk (SBR)



Obrázek 6 Chemický vzorec SBR [1]

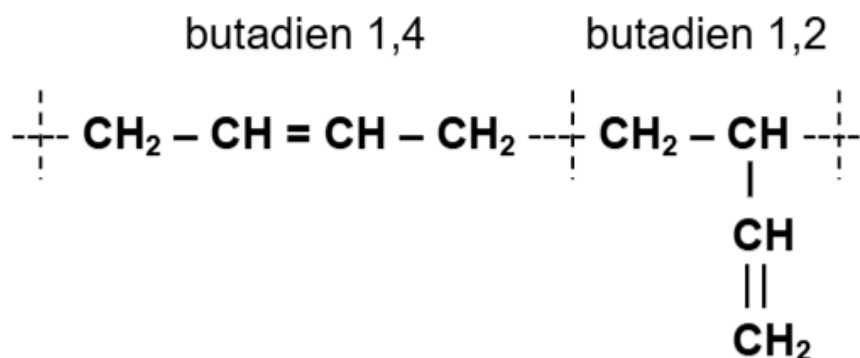
Surovinou pro výrobu SBR je ropa. SBR je kopolymer butadienu a styrenu. SBR se vyrábí s různým obsahem styrenu, v emulzi (E-SBR) i v roztoku (S-SBR).

Vlastnosti SBR vulkanizátů jsou podobné vlastnostem vulkanizátů z NR, jejich horní teplota aplikace však leží poněkud výše než u NR. SBR pokrývá cca 1/2 spotřeby syntetických kaučuků a je většinou používán ve výrobě pneumatik, kde doplňuje použití NR. Cenově je SBR srovnatelný s NR.

Blokové kopolymery SBS patří mezi tzv. termoplastické elastomery (TPE). Styrenové bloky za zvýšené teploty měknou, takže SBS mají za pokojové teploty vlastnosti podobné vulkanizátům a za zvýšené teploty jsou zpracovatelné plastikářskými technologiemi.

[1, 2, 3, 4]

1.2.2 Butadienový kaučuk (BR)



Obrázek 7 Chemický vzorec BR [1]

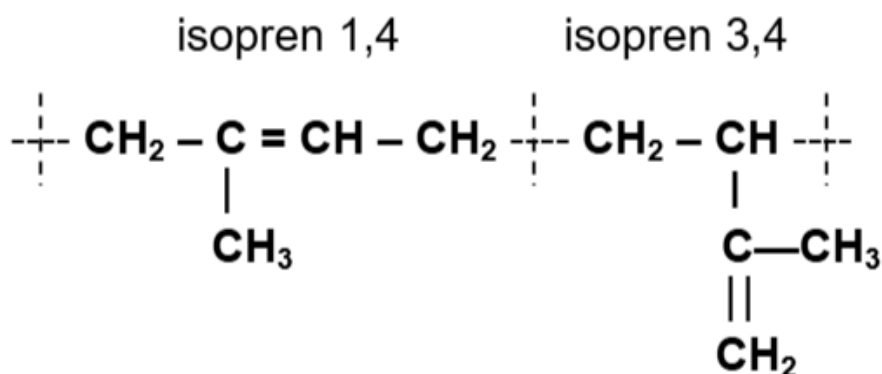
Polybutadien (BR) se vyrábí z butadienu a butadien je v něm během polymerace zabudován ve třech možných konfiguracích: jako cis-1,4; trans-1,4 a 1,2 (vinyl). Polybutadien se začal prodávat jako blokový polymer pod označením BUNA (BUtadien NAtrium). Z celé řady dříve vyráběných typů zbyla dnes BUNA 32, která se používá jako speciální změkčovaadlo. Výroba stereopolybutadienu (Stereo-BR) se provádí roztokovou polymerací za pomoci různých kovových katalyzátorů.

BR se podobně jako SBR vyrábí v emulzi i v roztoku. BR má ze všech kaučuků pro všeobecné použití nejnižší teplotu zesklennění. Při pokojové teplotě vykazuje BR velký studený tok, takže k jeho skladování jsou nezbytné speciálně vyztužené kontejnery.

Jednotlivé druhy BR se navzájem liší distribucí molekulových hmotností, větvením a uspořádáním monomerních jednotek v polymerním řetězci. Obvykle rozlišujeme typy s vysokým obsahem cis-struktur, typy s nízkým obsahem cis-struktur a vinylové typy.

BR samotný je obvykle obtížně zpracovatelný. Často se používá ve směsích s nepolárními kaučuky jako je NR a SBR, kde zlepšuje odolnost proti oděru, zvyšuje odolnost za nízkých teplot a elasticitu. Hlavní oblast použití je v pneumatikách. S rostoucí koncentrací BR v kaučukových směsích se snižuje koeficient tření pneumatik na mokré vozovce. Maximální koncentrace BR ve směsích pro běhouny pneumatik je proto omezená. Používá se také k přípravě houževnatého PS. [1, 2, 3, 4]

1.2.3 Isoprenový kaučuk (IR)



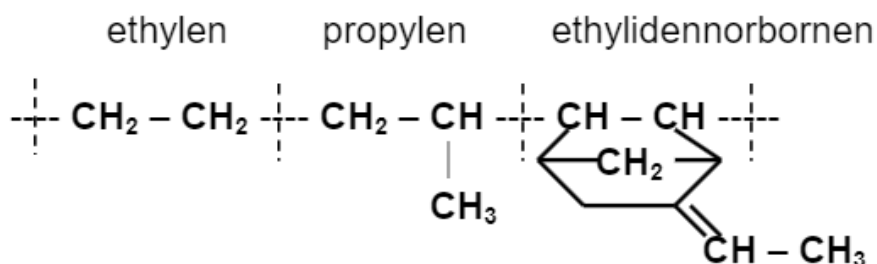
Obrázek 8 Chemický vzorec IR [1]

Podobně jako u BR jsou i u IR důležité stereoisopreny (Stereo-IR), jejichž vlastnosti závisí na použitém typu kovového katalyzátoru.

Syntetický polyisopren (IR) s vysokým obsahem cis-1,4 má podobné vlastnosti jako NR. V důsledku stabilnějších hodnot molekulové hmotnosti má IR poněkud stabilnější jak zpracovatelské vlastnosti, tak i rychlosti vulkanizace a před zpracováním odpadá potřeba plastifikace. Teplota zesklňování je u IR -70°C . Vulkanizáty z IR mají ve srovnání s NR poněkud nižší strukturní pevnost. IR má také užší distribuci molekulových hmotností než NR. Rozdíl je i v ceně obou kaučuků IR je alespoň 2x dražší než NR.

Použití IR je výhodné pro některé zdravotnické aplikace, kde by se mohla u některých pacientů vyskytnout alergická reakce na proteiny a další nečistoty obsažené v NR. Ve srovnání s NR kaučuk IR také méně zapáchá. [1, 2, 3, 4]

1.2.4 Ethylen-propylenové kaučuky (EPM a EPDM)



Obrázek 9 Chemický vzorec EPM [1]

EPM je kopolymer ethylenu a propylenu. Kopolymerací je omezena krystalizace polymerních řetězců a materiál se pak chová jako kaučuk. Na rozdíl od nenasycených kaučuků (NR, SBR) nemůže být EPM síťován sírou. Vulkanizace EPM se tedy provádí peroxidy nebo radiací. Pokud je v řetězci mimo ethylen a propylen přítomen jako třetí

monomer nekonjugovaný dien, vzniká terpolymer EPDM, který je možno síťovat nejen peroxidy, ale i sírou.

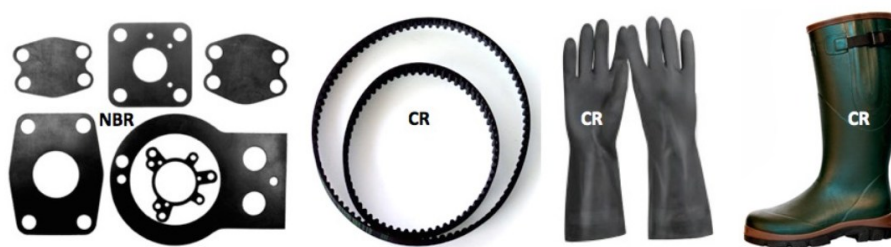
Amorfní typy s minimální krystalinitou jsou ohebnější za nízkých teplot, mají nižší tvrdost a vyšší elasticitu. Zvýšený obsah propylenu v semikrystalických typech dává EPDM lepší pevnost směsí před vulkanizací, vyšší pevnost, modul a tvrdost vulkanizátů, ale horší vlastnosti za nízkých teplot a horší trvalou deformaci. Jako maximální teplota pro dlouhodobé použití EPDM se uvádí 126 až 150 °C. Chování EPDM za chladu se podobá NR. Odolnost proti kyselinám a zásadám je u EPDM výrazně lepší než u NR a SBR.

EPDM má díky nasycenému hlavnímu řetězci velmi dobrou odolnost proti ozonu a povětrnosti. Proto se často používají k výrobě střešních fólií a těsnění pro okna. Ve směsích s NR zlepšuje EPDM odolnost proti ozonovému praskání, což je možno využít např. ve směsích pro bočnice pneumatik. Protože EPDM je odolné proti vodě, používají se k izolaci vodních nádrží. Vysoký elektrický odpor, který je důsledkem nepolárnosti kaučukového řetězce, umožňuje používat EPDM na obaly kabelů. Automobilové aplikace EPDM zahrnují hlavně různá těsnění a hadice pro radiátory a topení. [1, 2, 3, 4]

1.3 Speciální syntetické kaučuky

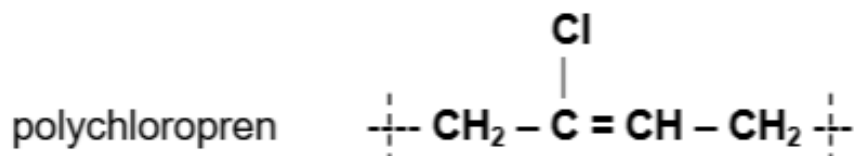
Zkratka	Název	Aplikace
CR	Chloroprenový kaučuk	Olejevzdorné
NBR	Butadien-akrylonitrilový kaučuk	
ACM	Akrylátový kaučuk	
OT	Polysulfidový kaučuk	
Q	Silikonové kaučuky	Tepluvzdorné
FPM	Fluorouhlíkový kaučuk	

Obrázek 10 Tabulka speciálních kaučuků [6]



Obrázek 11 Výrobky ze speciálních kaučuků [6]

1.3.1 Chloroprenový kaučuk (CR)



Obrázek 12 Chemický vzorec CR [1]

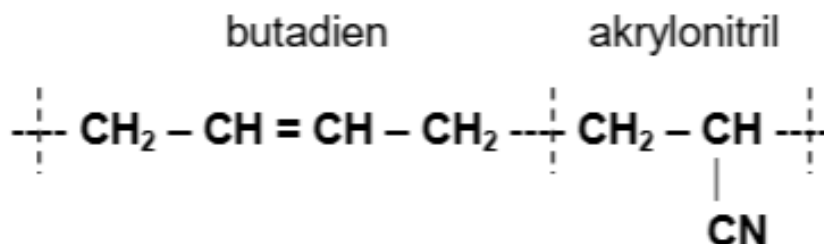
CR se vyrábí, obvykle emulzní polymerací, v řadě různých druhů. Některé druhy CR mají zlepšenou zpracovatelnost nebo upravené vlastnosti. Struktura CR může být ovlivněna kopolymerací chloroprenu se sírou nebo s 2,3-dichloro-1,3-butadienem a dává pak různé druhy polymerů s velmi rozdílnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi.

Ve srovnání se syntetickými kaučuky pro všeobecné použití mají všechny typy CR zlepšenou odolnost proti stárnutí, ozonu a slunečnímu záření. Dále také zvýšenou odolnost proti olejům a řadě chemikálií, vynikající houževnatost a zvýšenou odolnost proti hoření. Druhy CR vyráběné pro lepidla se vyznačují zvýšeným sklonem ke krystalizaci. Podobně jako NR je i CR schopen krystalizace pod napětím. Má proto dobré dynamické vlastnosti a vysoké pevnosti i v neplněných směsích. Ve srovnání s NR je však obvykle cena CR vyšší.

CR kaučuky se značně rozdílnými vlastnostmi zajišťují pokrytí velkého počtu aplikací s různými požadavky na vlastnosti vulkanizátů. CR pro použití v gumárenských směsích se dělí na tři základní typy.

- CR typu G jsou připraveny kopolymerací se sírou a modifikovaný thiuran disulfidem. Mají zvýšenou adhezi k NR a SBR směsím. Jsou ideální pro aplikace v podmínkách dynamického namáhání.
- CR typu W jsou homopolymery chloroprenu nebo jeho kopolymery s 2,3-dichloro-1,3-butadienem. Směsi jsou méně lepivé než u typu G a jejich vulkanizáty mají vysokou odolnost proti stárnutí za tepla.
- CR typu T obsahují vysoce síťované částice mikrogelů, které zlepšují jeho zpracovatelnost vytlačováním a válcováním. Vlastnosti vulkanizátů jsou podobné jako u typu W.

1.3.2 Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR)



Obrázek 13 Chemický vzorec NBR [1]

NBR je emulzní kopolymer butadienu a akrylonitrilu polymerovaný za tepla nebo za studena v mnoha různých typech. Koncentrace akrylonitrilu leží obvykle mezi 18 a 45 %. S rostoucím obsahem akrylonitrilu roste polarita kaučukových řetězců a odolnost NBR proti kapalným uhlovodíkům, zlepšuje se stárnutí za tepla a klesá ohebnost za nízkých teplot.

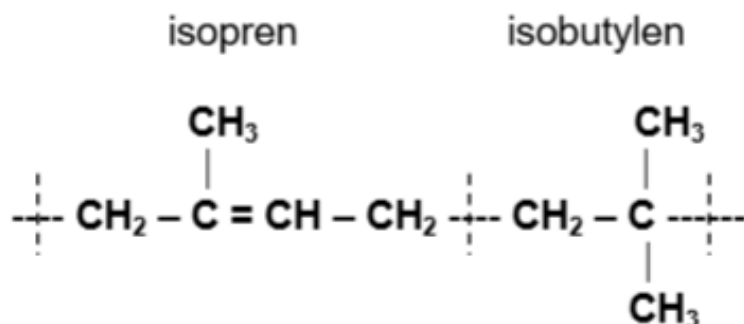
Za tepla polymerovaný NBR má vyšší stupeň větvení než NBR polymerovaný za studena, takže hůř teče. To je výhodné z hlediska vyšší adheze a pevnosti nevulkanizovaných směsí, u NBR směsí na lisování, výrobu lehčené pryže a na výrobu tenkostěnných nebo složitých vytlačovaných výrobků, kde je důležitá stabilita tvaru.

Za studena polymerovaný NBR má méně rozvětvené molekuly, nižší viskozitu a zpracovává se proto lépe než teplý NBR. Výsledkem je snadnější míchání s plnivý a změkčovadly, nižší teplota zpracování a nižší spotřeba energie při přetlačování, vytlačování a vstřikování.

NBR má lepší stárnutí za tepla než CR. Odolnost NBR proti povětrnosti je špatná podobně jako u NR a SBR, ale je možno ji zlepšit přidavkem PVC. Dobré mechanické vlastnosti má jen NBR vulkanizát s aktivními plnivý. NBR je nejlevnější olejovzdorný vulkanizát elastomeru. Je polární, takže má dobrou odolnost proti nepolárním kapalinám a nízkou odolnost vůči polárním rozpouštědlům.

Použití NBR je na ropných polích a v automobilovém průmyslu, protože teplota pod kapotou automobilu se zvyšuje požaduje se materiál z vyšší odolností proti stárnutí za tepla. [1, 2, 3, 4]

1.3.3 Butylkaučuk (IIR)



Obrázek 14 Chemický vzorec IIR [1]

IR kaučuky jsou kopolymery isobutylenu s 1 až 3 % isoprenu, připravené kationtovou polymerací při nízké teplotě. Jednotlivé druhy se navzájem liší obsahem isoprenu a viskozitou. Jsou i hvězdicové typy s vyšším stupněm větvení, které mají zlepšenou pevnost v nevulkanizovaném stavu.

Butylkaučuky dávají vulkanizátům dobré pevnosti i v neplněných směsích a zvýšený koeficient tření. Mají také malou odrazovou pružnost, a tedy vysoké mechanické tlumení a dobré elektroizolační vlastnosti. Mají díky nízkému obsahu dvojných vazeb dobrou odolnost proti povětrnosti, ozonu, zvýšeným teplotám, dobrou chemickou odolnost a dobrou odolnost proti polárním rozpouštědlům, ale i nízkou odolnost proti kapalným uhlovodíkům. IIR má velmi nízkou propustnost pro plyny.

Použití IIR zahrnuje duše a membrány pro vulkanizaci pneumatik, různé konstrukční prvky pro tlumení vibrací a zvýšení odolnosti vůči rázům, střešní folie a folie na izolaci proti vodě. [1, 2, 3, 4]

1.3.4 Akrylátové kaučuky (ACM)

Typické monomery pro výrobu polyakrylátových kaučuků (ACM) jsou ethylakrylát, butylakrylát a methoxyethylakrylát. K zajištění rychlé vulkanizace jsou do akrylátových kaučuků přidávány různé monomery s postranní skupinou umožňující snadné síťování, jako jsou epoxidová, karboxylová skupiny.

ACM mají díky své polární akrylátové skupině vynikající odolnost proti ropným olejům a palivům i za zvýšených teplot. Jsou odolné proti praskání při prolamování a proti

oxidaci, ozonu a slunečnímu záření. Nevýhodou ACM kaučuků je jejich relativně malá pevnost.

ACM kaučuky jsou dlouhodobě použitelné do 150 až 175°C. Při použití v horkém vzduchu jsou ACM kaučuky lepší než NBR. Hlavní použití tvoří těsnění pro automobilové motory, hadice a různé převody. [1, 2, 3, 4]

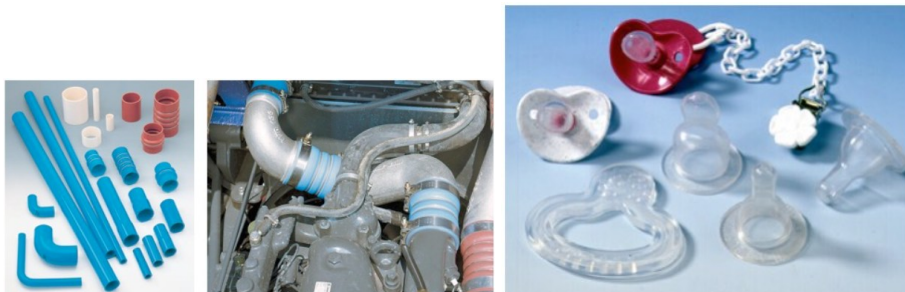
1.3.5 Silikonové kaučuky (Q)

Zahrnují širokou škálu kaučuků, které mají v hlavním řetězci vazbu – Si – O -. Silikonové kaučuky mohou být rozděleny do tří skupin.

- Polydimethylsiloxany: označení MQ nebo VMQ – pro všeobecné použití
- Polydimethylsiloxany s fenilovými substituenty: PMQ nebo PVMQ – zlepšená odolnost za nízkých teplot
- Polydimethylsiloxany s trifluorpropylovými substituenty: FVMQ nebo fluorosilikony – vynikající odolnost proti olejům a palivům

Písmeno V ve zkratkách označuje přítomnost malého množství vinylmethylsiloxanu, které se při polymeraci přidává ke zlepšení síťování. Předsměsi ze silikonových kaučuků obvykle připravují výrobci kaučuků, protože jejich příprava vyžaduje speciální zařízení.

Pevnost silikonů je nízká, ale v širokém rozmezí teplot se jen málo mění. Mají vynikající odolnost proti ozonu, povětrnosti, výborné elektroizolační vlastnosti a zlepšenou odolnost proti hoření. Jejich odolnost vůči kyselinám a zásadám a dalším kapalinám není dobrá, ale je možné ji zlepšit zavedením fluorových atomů, ale zhorší se tím zpracovatelnost. Cena silikonů je poměrně vysoká.



Obrázek 15 Příklad výrobků ze silikonového kaučuku [6]

Silikony se používají tam, kde se požaduje vysoká tepelná odolnost nebo velká ohebnost za nízkých teplot. Mají velmi nízkou strukturní pevnost a obecně se nehodí pro

aplikace za dynamických podmínek. Hlavní aplikace zahrnují letectví a kosmonautiku, medicínské aplikace, kontakt s potravinami a v automobilovém průmyslu. Peroxidem síťované fluorosilikony mají dobrou odolnost proti kapalinám a vynikající chování za nízkých teplot. Používají se na různé o-kroužky, těsnění, hadice a aplikace na ropných polích. [1, 2, 3, 4]

1.3.6 Fluorokaučuky

Fluorokaučuky jsou kopolymery odvozené od vinylidenfluoridu a hexafluorpropylenu. Mají ze všech kaučuků nejvyšší odolnost za zvýšených teplot, nejvyšší odolnost proti olejům a odolávají většině agresivních chemikálií. Vynikající tepelná odolnost a vysoká odolnost proti olejům je u těchto kaučuků důsledkem vysokého obsahu fluoru. S rostoucím obsahem fluoru roste odolnost vůči kapalinám.

FKM jsou fluoruhlovodíkové kaučuky s různým obsahem fluoru. Mají vynikající odolnost proti oxidaci, ozonu, palivům a ropným olejům a jsou odolné proti většině minerálních kyselin i při vysokých koncentracích. Aplikace FKM zahrnují např. vnitřní vrstvy palivových hadic automobilů.

TFE/P je kopolymer tetrafluorethylenu a propylenu. Má lepší odolnost proti zvýšené teplotě, páře, aminům a koncentrovaným alkáliím, ale horší odolnost proti benzenu a chlorovaným rozpouštědlům než FKM. Používá se např. v olejovzdorných těsněních pro automobily a při opláštování drátů a kabelů.

FFKM je kopolymer perfluormethylvinyleteru a tetrafluorethylenu. Má vynikající chemickou odolnost blízko PTFE. Používá se tam, kde žádný jiný elastomer není možno použít, především v olejářském a chemickém průmyslu. Cena je velmi vysoká. [1, 2, 3, 4]

1.4 Kaučuky vyztužené kordy

Kaučuky vyztužené kordy, často označované jako kompozity, jsou materiály, které kombinují vlastnosti dvou nebo více materiálů. Tyto materiály jsou využívány pro svou zvýšenou pevnost, tuhost a odolnost. Skládají se obvykle z matrice (polymer) a výtěžných vláken (bavlněná, skelná, uhlíková, aramidová, polyamidová). Používají se zejména pro svou vysokou pevnost při nízké hmotnosti. Jsou však složitější na výrobu a recyklaci a taky mají vyšší cenu. Použití těchto materiálů v automobilovém a leteckém průmyslu (výroba pneumatik, lehkých a pevných součástí), stavebnictví a pro výrobu sportovního vybavení.

1.4.1 Kordy

Kordy jsou vlákna nebo svazky vláken které jsou používány k vyztužování materiálů. Díky kordům získává materiál lepší mechanické vlastnosti (zvýšenou pevnost, odolnost atd.). Také pomáhají rozložit a přenášet zatížení v materiálu.

Druhy kordů:

- Skelná vlákna
- Uhlíková vlákna
- Aramidová vlákna
- Bavlněná
- Polyamidová

[7, 8]

2 GUMARENSKÉ SMĚSI

Gumárenské směsi se stále vyvíjejí, protože ani suroviny, ani jejich ceny nejsou stálé. Důvody jsou jak technické, tak i ekonomické. V gumárenských směsích se obvykle koncentrace přísad označuje dsk (díly na sto dílů kaučuku) nebo phr (z anglického parts per hundred rubber). Základ gumárenské směsi vždy tvoří 100 dílů kaučuku. Pokud je použitý kaučuk nastaven olejem nebo sazemi, musí se jeho dávkování zvýšit, aby i v takové směsi bylo 100 dílů kaučuku. Použití 100 dílů kaučuku jako základ směsi usnadňuje dávkování nekaučukových přísad (např. vulkanizační činidla a plniva), protože vyjádření jejich koncentrace stejnou hodnotou dsk zajišťuje stejný poměr kaučuku a přísad pro různé kaučukové směsi. [1, 9, 10]



Obrázek 16 Gumárenská směs [11]

2.1 Plniva

Kaučuky mají schopnost pojmout vysoké koncentrace plniv a dalších přísad. Plniva výrazně zlepšují některé aplikační vlastnosti kaučukových směsí a vulkanizátů. Téměř všechny gumárenské výrobky jsou proto plněné.

Plniva vnášejí do vulkanizátu mnoho míst tření na rozhraní kaučuku a plniva. Tím dochází k disipaci energie, takže se materiál tak snadno neporuší. Pevnostní chování nejvíce ovlivňuje specifický povrch přítomného plniva, který určuje plochu, na které k těmto dějům dochází. Další vlastnosti jako viskozita směsi, narůstání za hubicí, tvrdost, modul, elektrická a tepelná vodivost vulkanizátu, propustnost pro kapaliny a plyny jsou ovlivňovány jak koncentrací, tak i vlastnostmi použitých plniv, zvláště pak jejich strukturou. [1, 9, 10, 23]

2.2 Změkčovadla

Změkčovadla se používají ke snížení viskozity a zvýšení plasticity kaučukové směsi. Ve vztahu ke kaučuku jsou to rozpouštědla a zředňovadla. Protože při vulkanizaci se obvykle změkčovadla nezabudovávají do sítě, působí jejich přítomnost snížení síťové hustoty a tím ovlivní i vlastnosti vulkanizátů.

Volbu vhodného změkčovadla pro daný kaučuk je možno provést na základě srovnání parametrů rozpustnosti kaučuku a změkčovadla. Čím jsou hodnoty těchto parametrů navzájem bližší, tím lepší je vzájemná snášenlivost obou složek. Maximální dávkování změkčovadel se řídí podle množství, které je schopen daný kaučuk pojmout. Tuto hodnotu je možno určit z rovnovážného botnění kaučuku v daném změkčovadle.

Pokud není změkčovadlo s kaučukem dostatečně snášenlivé nebo pokud je jeho koncentrace ve směsi příliš vysoká, může dojít k jeho vystupování na povrch. Vznikne lepivá vrstva na povrchu výrobku a obvykle dojde ke zhoršení fyzikálních vlastností vulkanizátu. Pokud má změkčovadlo příliš nízký bod varu, nebo pokud obsahuje hodně těkavých podílů, dochází při vulkanizaci za vysokých teplot ke vzniku pórů v materiálu. Gumárenská směs musí být také rozumně zpracovatelná. Např. příliš velké množství změkčovadla může způsobit potíže při míchání kaučuku. [1, 9, 10, 12]

2.3 Antidegradanty

Antidegradanty, nebo také stabilizátory dlouhodobě chrání pryž proti vnějším vlivům a stárnutí. Existuje několik základních druhů. Antioxidanty působí jako ochrana před působením kyslíku a antiozonanty proti ozonu a světelné stabilizátory jako ochrana proti UV záření. Podle prostředí, ve kterém se materiál používá, rozhodujeme o použití antidegradantů anebo celkového antidegradačního systému. [13]

2.4 Vulkanizační systémy

Kaučuky, syntetické i přírodní, se v praxi používají ve formě vulkanizátů. K dosažení požadovaných vlastností vulkanizátů potřebujeme vhodnou kombinaci kaučuků a vulkanizační přísad. Vulkanizační systém sestává z vulkanizačního činidla (síťovadla) a z kombinace urychlovačů, aktivátorů a retardérů. Každá část tohoto systému má specifický úkol. [1, 9, 10]

2.4.1 Vulkanizační činidla

Vulkanizační činidlo zajišťuje síťování kaučuků pomocí chemických reakcí. Síťováním přechází plastická kaučuková směs v elastický vulkanizát. Rozlišujeme sirnou a bezsirnou vulkanizaci, které se zásadně liší nejen chemicky, ale i kinetikou. Jako vulkanizační činidla se používá síra, peroxidy, oxidy kovů atd. [14]

2.4.2 Urychlovače

Řadíme je mezi nejdůležitější prvky vulkanizace. Urychlovače mají podstatně velký vliv na průběh vulkanizace a vlastnosti daného vulkanizátu. Systém urychlovačů řídí rychlost síťovacích reakcí. Může obsahovat jednu nebo více složek. [15]

2.4.3 Aktivátory, inhibitory

Aktivátory jsou organické nebo anorganické látky. Systém aktivátorů zvyšuje účinnost urychlovačů a vulkanizačních činidel.

Inhibitor nebo také retardéry vulkanizace prodlužují zpracovatelskou bezpečnost. Pomáhají zabránit předčasnému navulkanizování směsi. [1, 9, 10, 23]

2.5 Zvláštní přísady

Mezi další přísady gumárenských směsí můžeme řadit tzv. zvláštní přísady což jsou plastikační činidla nebo nadouvadla.

2.5.1 Plastikační činidla a Nadouvadla

Plastikační činidla jsou sloučeniny které se používají k urychlení plastikace materiálu. Umožňují výrazně zkrátit plastikační dobu.

Nadouvadla se používají pro výrobu pórovitých materiálů. Nadouvadlo se při vulkanizaci za působení teploty mění v plyn, který tvoří v materiálu póry. [1, 9, 10]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vlastnosti, které charakterizují materiál můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První skupina jsou vlastnosti fyzikální (mechanické) a druhou skupinou jsou vlastnosti chemické. Tyto vlastnosti se mohou měnit v závislosti na způsobu výroby materiálu, dále také působením teploty, času atd. Fyzikální vlastnosti materiálu charakterizují zejména tahové vlastnosti, jako je pružnost, plasticita, pevnost, tvrdost, a houževnatost. Fyzikálních vlastností materiálu je však mnohem více např. pružnost se dále popisuje modulem pružnosti v tahu/tlaku E [MPa], modulem pružnosti ve smyku G [MPa], objemovým modulem pružnosti K [MPa] a koeficientem příčné kontrakce μ (Poissonovo číslo).

Chemické vlastnosti jsou stabilita a jistá odolnost elastomeru v různých prostředích, elektroizolační vlastnosti, nepropustnost pro kyseliny, odolnost vůči agresivním vlivům.

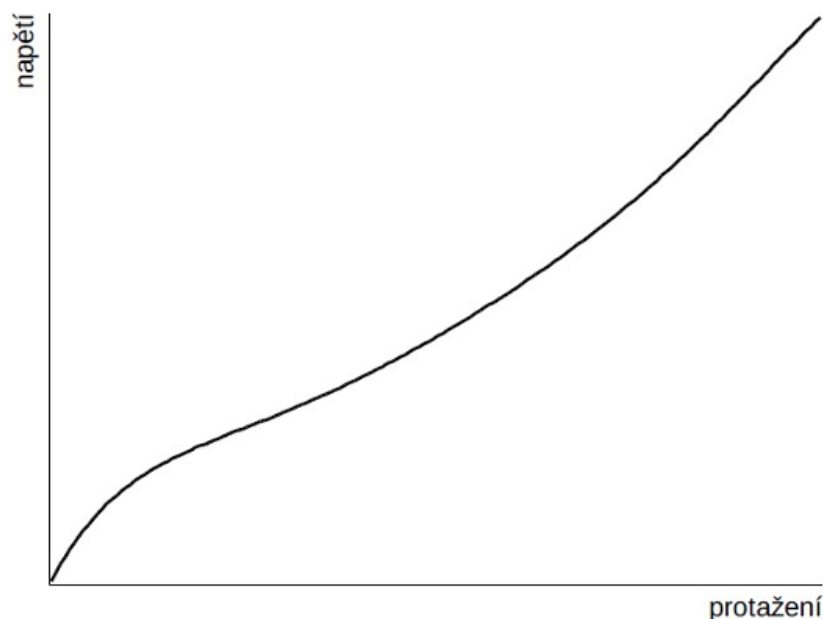
Vlastnosti elastomerních materiálu se v mnoha směrech liší od vlastností ostatních materiálů. Rozdíly jsou jak ve fyzikálních, tak v chemických vlastnostech. Hlavní předností elastomerních materiálu je jejich vysoká elasticita (hyperelasticita) [16, 17]

3.1 Hyperelasticita

Elastomery se vyznačují některými vlastnostmi. Kterými se výrazně liší od většiny ostatních materiálů (ideálně elastických). Mezi hlavní přednosti patří hyperelasticita, která je jejich charakteristickou vlastností. Je to vlastnost opakovaně snášet velké deformace.

Hlavní znaky hyperelasticity jsou:

- Velké elastické (vratné) deformace, které jsou mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek.
- Tažnost dosahuje několikaset procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci je silně nelineární.
- Materiál se deformuje již účinkem malých sil.
- Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je asi deset tisíckrát menší než u ideálně elastických látek
- Objemová tuhost většiny elastomerů je velmi vysoká. To znamená že většinu těchto materiálů můžeme považovat za objemově nestlačitelné.



Obrázek 17 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [17]

Další charakteristickou vlastností elastomerů je časová závislost deformace. Deformační přeměny probíhají se zpožděním, protože jsou bržděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování elastomerů má elastické i viskózní projevy současně. Toto chování se označuje jako viskoelastické. Mechanické chování elastomerů je také velice ovlivněno teplotou. Při nízkých teplotách výrazně roste tuhost materiálu a může se přiblížit až vlastnostem kovů. Naopak při vysokých teplotách dochází k velkému poklesu tuhosti. Z tohoto vyplývá že pro použití Hookeova zákona nejsou splněny dvě základní podmínky:

- Závislost deformace na napětí není lineární
- Dochází k příliš velkým deformacím, větší než 2 %

Přesto se dá použít v aplikacích, kde se nepředpokládají velké deformace zatěžovaného prvku. Pro přesnější výpočty nebo pro případy větších deformací je nutné použít nelineární popis závislosti napětí – deformace.

K tomu se používají nelineární hylerelastické materiálové modely. Tyto modely jsou založeny na definici vztahu ro potenciální deformační energie W . Část hylerelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů (Neo-Hookean, Arruda-Boyce). Další skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů, aby model co nejlépe odpovídal těmto

pozorováním. Tyto modely (Polynomický, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Gent) jsou nazývány fenomenologické.

Dnes používané hyperelastické modely obecně formulují vztah pro hustotu deformačního potenciálu ve tvaru:

$$W = W(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \text{ nebo } W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\}) \quad (1)$$

Kde I_i jsou invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, λ_i jsou hlavní protažení a $\{M\}$ je množina materiálových konstant.

Protažení λ_i je poměrem deformované délky l_i ve směru osy i k původní délce l_0 .

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} \quad (2)$$

Deformační invarianty jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Pro nestlačitelné materiály je $I_3 = 1$.

Pokud známe funkci W , můžeme napětí vypočítat jako derivaci této funkce podle příslušné složky deformace.

$$S_{ij} = 2 \frac{W}{C_{ij}} \quad (4)$$

Kde S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složky pravého

Cauchy-Greenova deformačního tenzoru.

Pokud je souřadný systém shodný s hlavními směry deformace, pak je Cauchy-Greenův deformační tenzor definován takto:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Z rovnice (4) lze tedy odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\frac{W}{I_1}C_{ij} - 2\frac{W}{I_2}C_{ij}^{-1} \quad (6)$$

Kde p je nespecifikovaný tlak a δ_{ij} je Kronekerova delta, pro které platí ($\delta_{ij} = 1, i = j$; $\delta_{ij} = 0, i \neq j$). [16, 17, 18]

3.2 Modely

Jednotlivé hyperelastické modely se liší definicí funkce hustoty deformační energie W .

3.2.1 Polynomická funkce

Polynomická forma je založena na prvním a druhém invariantu. Jde o model jenž má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j \quad (7)$$

Kde c_{ij} značí hodnoty materiálových konstant a za N dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna, ovšem N většinou nedosahuje vyšších hodnot než 3. Muže být použita pro deformace dosahující až 300 %. [16, 18, 25]

3.2.2 Neo-Hookean

Patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Můžeme ho brát jako podmnožinu polynomické funkce. Je založen na termodynamických principech a na statickém přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. Model je použitelný pro deformace do 40 % v jednoosém namáhání. Dále také zakazuje lineární chování při smykové deformaci.

$$W = \frac{\mu}{2}(I_2 - 3) \quad (8)$$

Kde μ je počáteční smykový modul.

$$\mu = nkT \quad (9)$$

Kde n značí počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota. [16, 18]

3.2.3 Yeoh

Je podobný polynomické funkci, ale nepoužívá druhý deformační invariant a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Výhodou tohoto modelu je jeho jednoduchost. Je definován jako:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (10)$$

Kde c_{i0} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, Ale obvykle není hodnota vyšší než 3. Pokud se $N = 1$ jde o model Neo-Hookean. Obecně poskytuje dobré výsledky pro velké deformace, ale už nemusí být tak přesní při nízkých hodnotách deformace. [16, 18]

3.2.4 Mooney-Rivlin

Můžeme ho považovat za speciální případ polynomické funkce. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založený na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. Později jeho model Rivlin modifikoval tak aby pomocí deformačních invariantů získal obecné vyjádření funkce deformační energie. Používá se dvou, tří, pěti a devíti-parametrové Mooney-Rivlin modely.

- Dvou-parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Je ekvivalentní polynomické funkci s $N = 1$.

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

Kde c_{10} a c_{01} jsou materiálové konstanty.

- Tří-parametrový model je stejný s polynomickou funkcí pro $N = 2$ a $c_{20}=c_{02}=0$.

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (12)$$

Kde c_{10} , c_{01} a c_{11} jsou materiálové konstanty.

- Pěti-parametrový model je stejný s polynomickou funkcí pro $N = 2$.

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (13)$$

Kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} a c_{02} jsou materiálové konstanty.

- Devíti-parametrový model je stejný s polynomickou funkcí pro $N = 3$.

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \\ & + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) \\ & + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \end{aligned} \quad (14)$$

Kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} a c_{03} jsou materiálové konstanty.

Dvou-parametrový model se využívá do 90 až 100 % tahové deformace. Nemusí však být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení. Pět nebo devět-parametrové modely mohou být použity pro deformace až 300 %. [16, 18, 25]

3.2.5 Arrude-Boyce

Je to model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomeru. Lze jej považovat za rozšíření modelu Yeoh pro $N = 5$.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (15)$$

Kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750} \quad (16)$$

Kde μ je počáteční smykový modul a λ_L charakterizuje tzv. limitní protažení sítě, kdy se síť dále neprotahovat a napětí se začíná blížit nekonečnu. Jestli se hodnota λ_L rovná nekonečnu stává se z Arruda-Boyce model Neo-Hookean. Vhodný použití modelu pro deformace do 300 %. [16, 18]

3.2.6 Gent

Gentův model se podobá modelu Arruda-Boyce, protože také používá lineární síťování protažení, ale nevychází z modelu vnitřní struktury elastomerů. Výhody modelu jsou v jeho jednoduchosti a schopnosti zaznamenat závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy.

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln \left(1 - \frac{(I_1 - 3)}{I_m} \right) \quad (17)$$

Kde E je počáteční modul pružnosti, pro nestlačitelné materiály je tento modul 3μ . I_m nám říká limitní hodnotu členu $(I_1 - 3)$, bývá podobná jako λ_L v Arruda-Boyce modelu. V případě, že se hodnota přirozeného logaritmu zvyšuje, výsledná forma bude podobná modelu Yeoh. Když se bude I_m rovno nekonečnu, model přejde na formu Neo-Hookean. [16, 18]

3.2.7 Ogden

Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. Tento model je široce používán a vcelku dobře vystihuje chování elastomeru i při velkých deformacích. Při dosažení specifických hodnot do rovnice se Ogdenův model stává ekvivalentní k modelu

Neo-Hookean nebo přechází na dvouparametrový model Mooney-Rivlin. Model může být obecně používán pro deformace do 700 %.

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

Kde μ_i a α_i jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu. Za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale většinou není hodnota N větší než 3. [16, 18]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Metody sloužící pro popis vlastností daných materiálů, nazýváme mechanické zkoušky. Zjišťujeme mechanické vlastnosti materiálu za pomoci působení vnějších sil. Mechanické zkoušky dělíme na zkoušky statické, dynamické a únavové. Elastomery se svými vlastnostmi a chováním při mechanických zkouškách liší od ostatních testovaných materiálů. Nejvýraznější vlastností je, že po skončení zatěžování se z větší části vrátí do původního tvaru před zatížením.

Elastomery běžně testujeme statickými i dynamickými zkouškami mezi které patří zkoušky v tahu, tlaku a ve smyku. K získání potřebných parametrů pro hyperelastické modely je nutné materiál zkoušet na jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a na čistý smyk. Vzhledem k různorodosti elastomerů je potřeba pro každou konkrétní analýzu přesně stanovit materiálové konstanty pro daný materiál. Při zkoušení elastomerů existuje několik parametrů, které mají značný vliv na výsledky zkoušky. Mezi ně patří čas, který určuje, jak rychle se mění působící síla. Záleží také na rozměrech a tvaru zkušební tělesa. Dále také na teplotě, protože se elastomery při různých teplotách chovají jinak. [16, 19, 20]

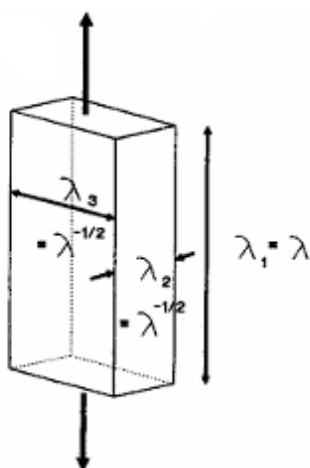
4.1 Jednoosá napjatost (tahová zkouška)

Jednoosou napjatostí jsou myšleny zkoušky, při kterých je zkušební těleso namáháno a deformováno ve směru pouze jedné osy. Mezi takové zkoušky patří zkouška tahem. Jednoosá napjatost je definována poměrným protažením kdy $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}}$. Tato definice deformace je založena na stavu objemové nestlačitelnosti kdy se objem nemění z toho $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = 1$.

Boční strany zkušební tělesa nejsou zatíženy a proto platí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Rovnice skutečného napětí bude:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (19)$$

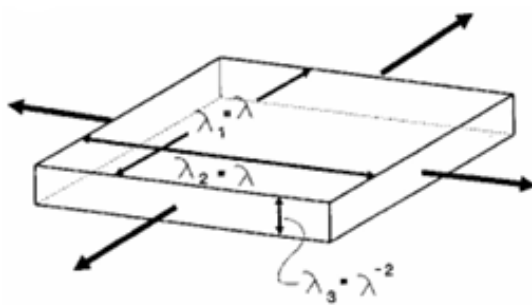
Kde W je měrná deformační energie, a I jsou deformační invarianty. [16, 19, 20, 24]



Obrázek 18 Jednoosá
napjatost [17]

4.2 Dvouosá napjatost (zkouška dvouosým zatížením)

Při dvouosé napjatosti je nutné plochý vzorek zkoušeného materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny. Tohoto stavu můžeme docílit několika způsoby. Vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem, roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů nebo roztahováním kruhového vzorku radiálně ve směru od středu.

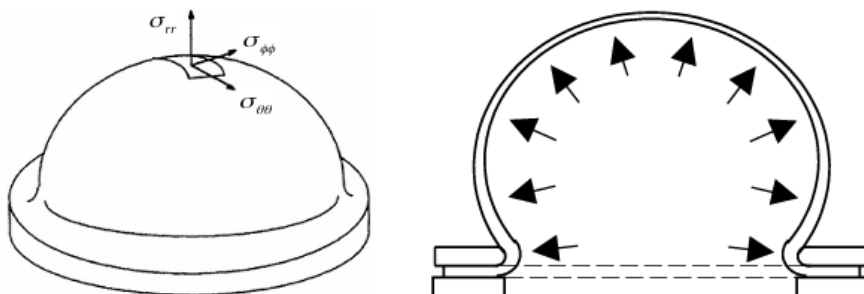


Obrázek 19 Dvouosá napjatost [17]

U dvouosého zatížení je poměrné prodloužení definováno jako $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}}$ a napětí σ_3 je v tomto případě nulové. Skutečné napětí můžeme vyjádřit rovnicí:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) \quad (20)$$

Konstrukčně nejjednodušší je zkouška nafukování zkušební tělesa stlačeným vzduchem. Naopak může být u tohoto typu zkoušky velmi obtížné zaznamenávat deformace v průběhu testování. [16, 19, 20, 21]



Obrázek 20 Metoda dvouosého tahu nafukováním zkušební tělesa [17]

4.3 Čistý smyk (smyková zkouška)

Čistého smyku můžeme v tělese dosáhnout tak že budeme natahovat podélný vzorek jehož výška bude alespoň desetkrát větší než jeho šířka. Při zkoušce se zkušební těleso upne a následně se začne natahovat v jednom směru což je podobné s průběhem tahové zkoušky. Čistým smykem je myšlen stav, kdy je těleso zatíženo v jednom směru a zároveň je zabráněno ve změně šířky ve směru druhém. Při deformaci je poměrné prodloužení definováno jako $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 1$, $\lambda_3 = \lambda^{-1}$, napětí $\sigma_3 = 0$ a napětí σ_2 je nenulové.

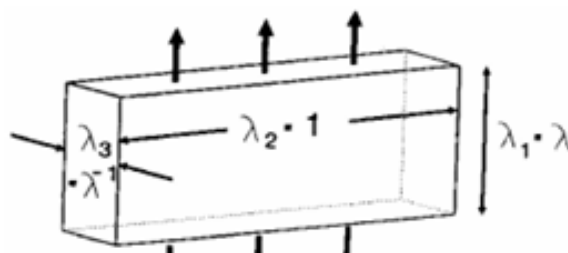
[16, 19, 20, 22]

Skutečná napětí v protahovaném směru je dáno rovnicí:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (21)$$

Skutečné vedlejší napětí je dáno rovnicí:

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



Obrázek 21 Čistý smyk [17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

- Zjištění vlivu geometrie zkušebního tělesa na vlastnosti kompozitní vrstvy
- Návrh metodiky zkoušení elastomerních kompozitů vyztužených kordy
- Charakteristika chování elastomerů vyztužených kordy

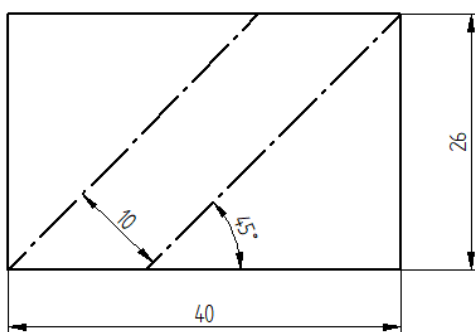
5.1 Materiály

Byly zkoušeny dva rozdílné materiály.

- Kord: PES (polyester) – 144 1x2, pogumovací směs: kaučuky NR, SBR, saze 64 dsk
- Kord: PA (polyamid) – 140 1x2, pogumovací směs: kaučuky NR, SBR, saze 44 dsk

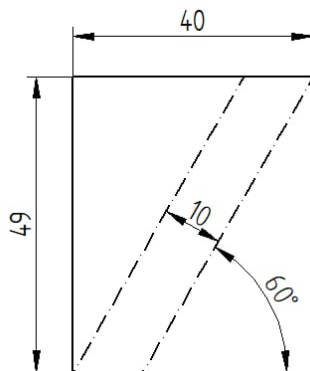
Z větších kusu materiálu byly nastříhány zkušební tělesa o různé geometrii.

- Geometrie 1: kordy pod úhlem 45° , šířka 40 mm, délka 26 mm



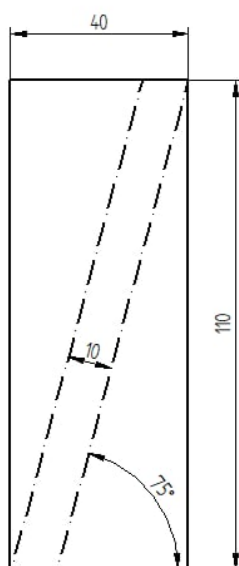
Obrázek 22 Zkušební těleso 1

- Geometrie 2: kordy pod úhlem 60° , šířka 40 mm, délka 49 mm



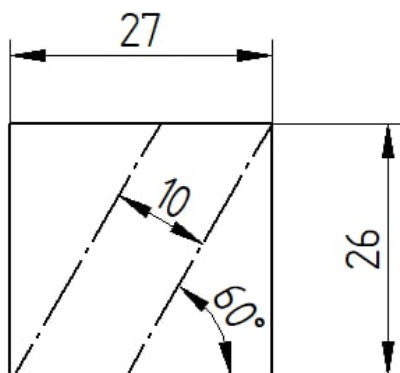
Obrázek 23 Zkušební těleso 2

- Geometrie 3: kordy pod úhlem 75° , šířka 40 mm, délka 110 mm



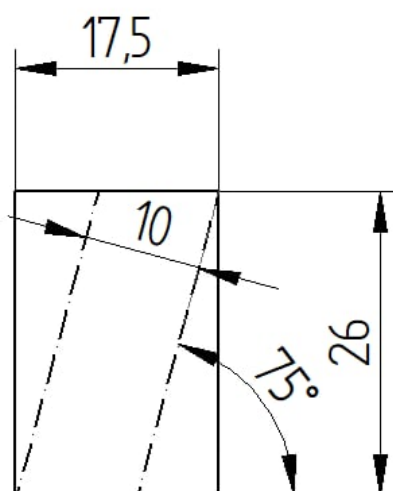
Obrázek 24 Zkušební těleso 3

- Geometrie 4: kordy pod úhlem 60° , šířka 27 mm, délka 26 mm



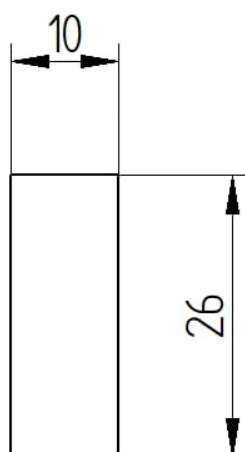
Obrázek 25 Zkušební těleso 4

- Geometrie 5: kordy pod úhlem 75° , šířka 17,5 mm, délka 26 mm

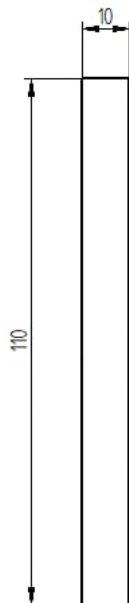


Obrázek 26 Zkušební těleso 5

- Geometrie 6: kordy ve směru namáhání, šířka 10 mm, délka 26 mm

Obrázek 27 Zkušební
těleso 6

- Geometrie 7: kordy Ve směru namáhání, šířka 10 mm, délka 110 mm



Obrázek 29
Zkušební těleso 7

Každé zkušební těleso bylo delší o 80 mm aby se dalo upnout do stroje. Od každé geometrie bylo nastříháno pět zkušebních těles celkem 35 těles. Pro oba materiály tedy 70 zkušebních těles.



Obrázek 28 Zkušební těleso

5.2 Zkušební zařízení

Měření bylo prováděno za laboratorních podmínek a při teplotě 24 °C. Zkoušky byly prováděny na stroji SHIMADZU AGS.

Tabulka 1 Informace o stroji

Název	SHIMADZU AGS – 50kNXD
Rozsah zdvihu příčnicku	0 mm – 1000 mm
Rychlost zdvihu příčnicku	0,001 mm/min – 1600 mm/min
Šířka pracovního prostoru	425 mm
Maximální motná síla	50 kN
Přesnost měření	± 1% indikované síly
Počítačový software	TRAPEZIUM



Obrázek 30 Zkušební stroj

Pro měření bylo použito zařízení od firmy Sobriety s.r.o. Měření bylo provedeno pomocí metody DIC – digital image correlation (korelace digitálního obrazu). Zařízení se skládá ze stativu se dvěma senzory (kamerami) a světly, skříně s PC se softwarem. Jádrem celého systému je software Mercury RT. Ten zaznamenává měření a provádí výpočty.

V měření pomocí DIC jsou využívány korelace, která měří vzájemný vztah dvou proměnných. Zkoumaná oblast se rozdělí virtuální mřížkou na menší oblasti. Pomocí korelace a korelačního algoritmu těchto oblastí před zahájením a po skončení zkoušky se určí posunutí jednotlivých bodů. [26]

Tabulka 2 Informace o zařízení

Kamery	Basler
Pracovní rozlišení	5 MPx
Počítačový software	Mercury RT
Manometr	BD Sensors DMP 331i
Rozsah manometru	0 až 6 bar
Přesnost manometru	0,125 %FSO

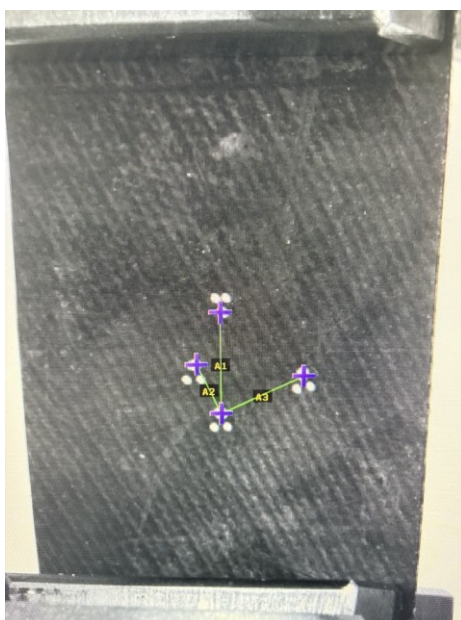


Obrázek 31 Sestava DIC

5.3 Postup měření

1. Jako první byly nastříhány zkušební tělesa, z každého materiálu 35 kusů.
2. Na každé zkušební těleso byly udělány bílé body, aby se dalo lépe měřit prodloužení.

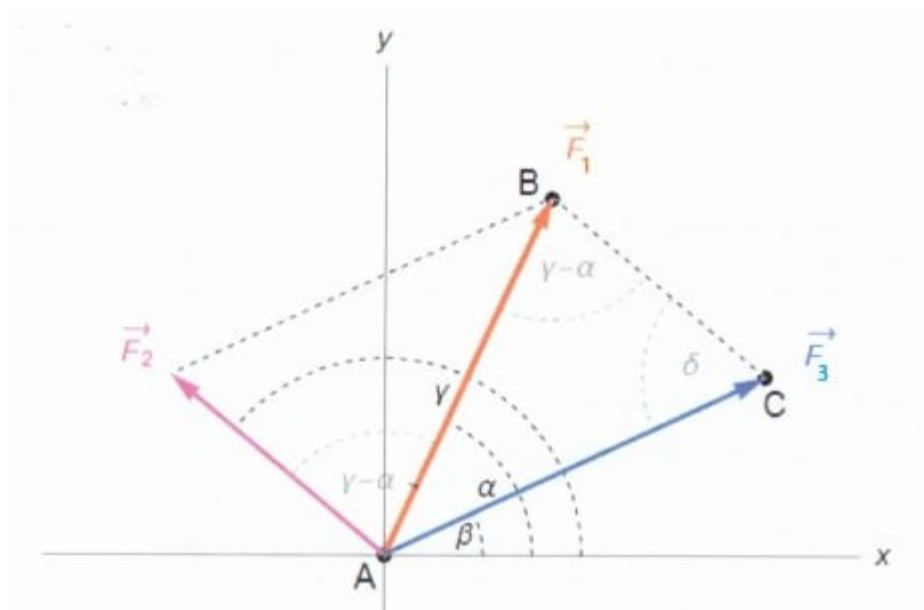
3. Kalibrování zkušebního stroje, taky nastavení, kalibrace a zaostření kamer snímající průběh celého měření.
4. Upnutí zkušebního tělesa do stroje.
5. Byly spuštěny kamery a následně byla spuštěna zkouška, rychlost zatěžování 30 mm/min.
6. Zkouška pokračovala, dokud nebylo dosaženo síly 1 000 N nebo dokud se zkušební těleso nezačalo vyklouzávat z čelistí.
7. Poté byla zkouška ukončena a postup byl zopakován pro všechny zkušební tělesa.



Obrázek 32 Zkušební těleso při zkoušce

5.4 Zpracování výsledků

Do software Mercury RT byly přidány potřebné vzorce pro výpočet síly a poměrného prodloužení. Z naměřených a vypočtených hodnot byly následně zpracovány grafy. Sílu, kterou jsme ze zkoušky obdrželi jsme museli rozložit do potřebných směrů pomocí sinové věty.



Obrázek 33 Rozklad síly do dvou složek

F_1 – Síla stroje, F_2 – Síla v kordech, F_3 – Sekundární síla

Vztah pro výpočet síly F_3 :

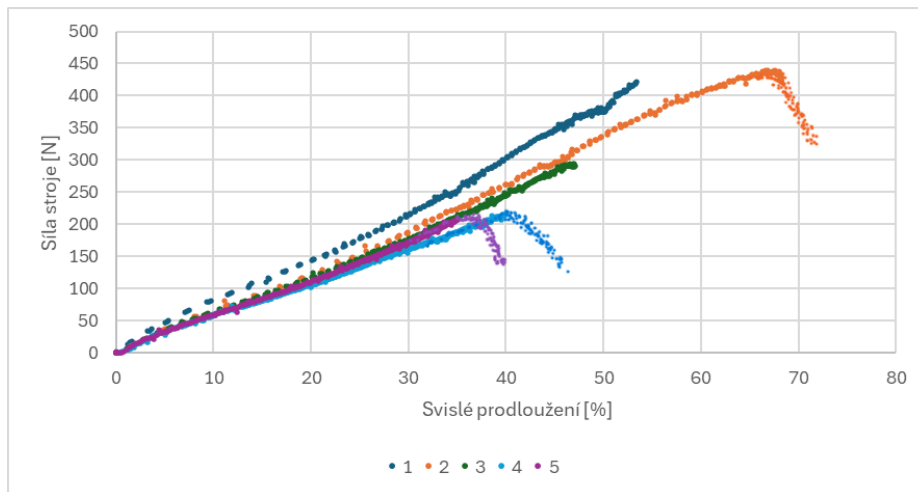
$$F_3 = F_1 \cdot \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin(\gamma - \beta)} \quad (23)$$

Analogicky pak můžeme vyjádřit velikost síly F_2 :

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{\sin(\alpha - \alpha)}{\sin(\gamma - \beta)} \quad (24)$$

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Při měření některá zkušební tělesa po dosažení určité síly začala vyklouzávat z čelistí, a proto se začala síla zmenšovat, jak můžeme vidět na grafu. Proto jsou v grafech prezentována data jen do okamžiku vyklouznutí.

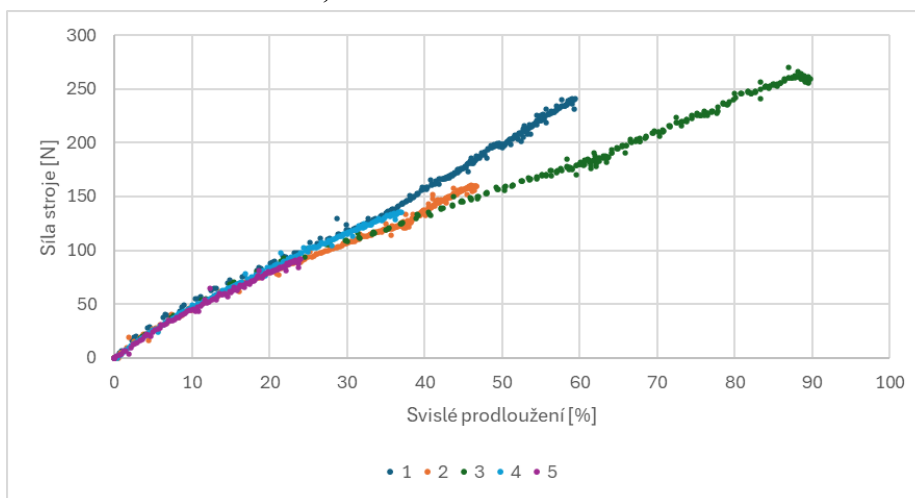


Obrázek 34 Celkový průběh zkoušky

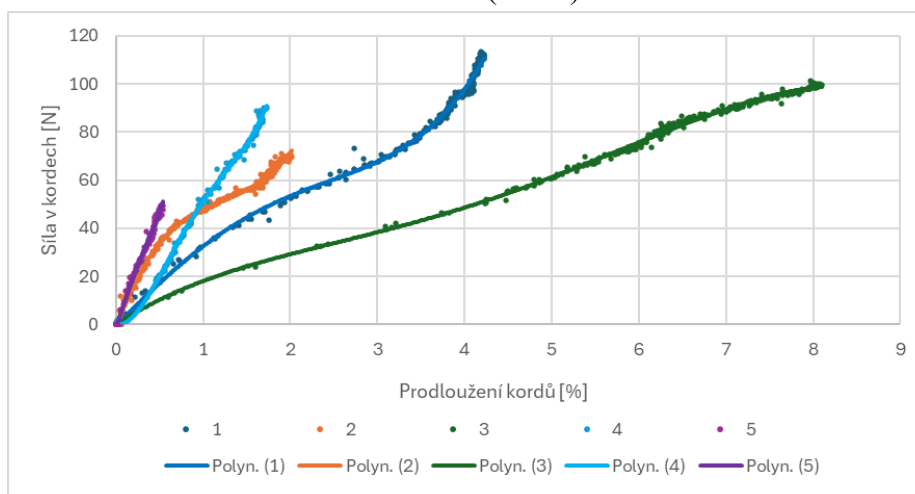
(geometrie 2: 40 x 49 mm,úhel 60°)

6.1 Zkušební tělesa s PA kordy

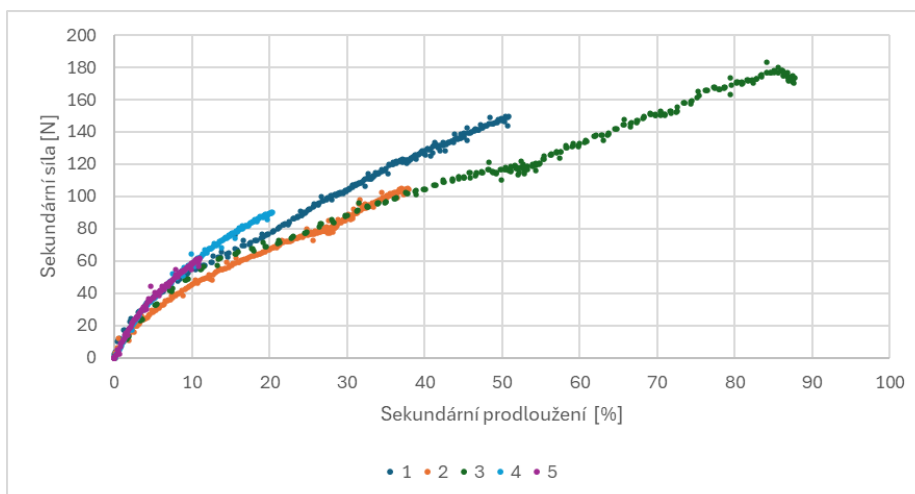
6.1.1 Geometrie 1: 40 x 26 mm, úhel 45°



Obrázek 37 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

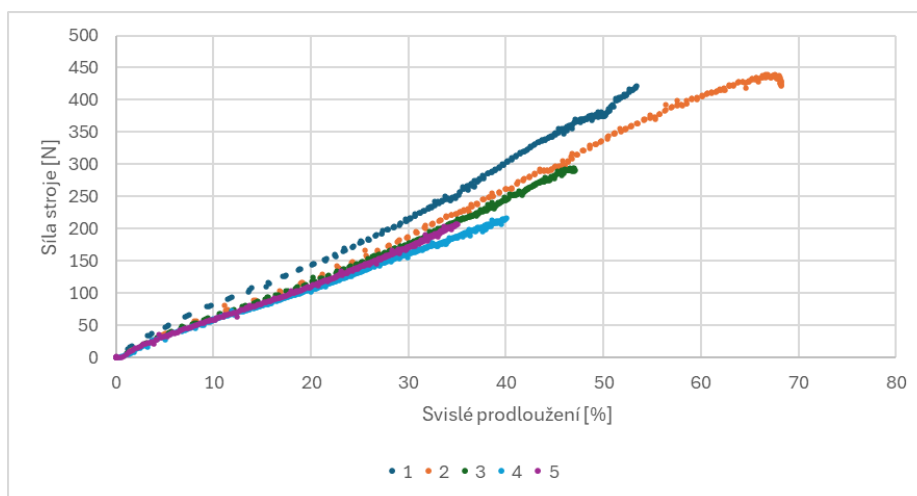


Obrázek 36 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

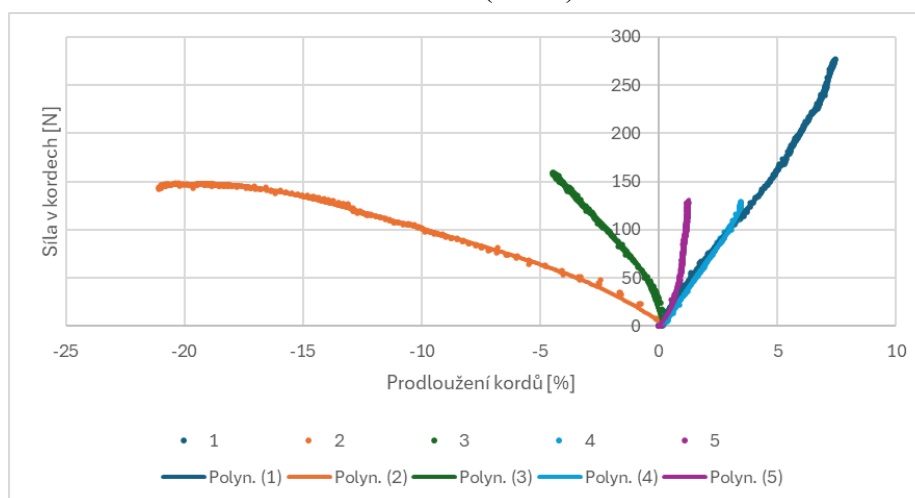


Obrázek 35 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

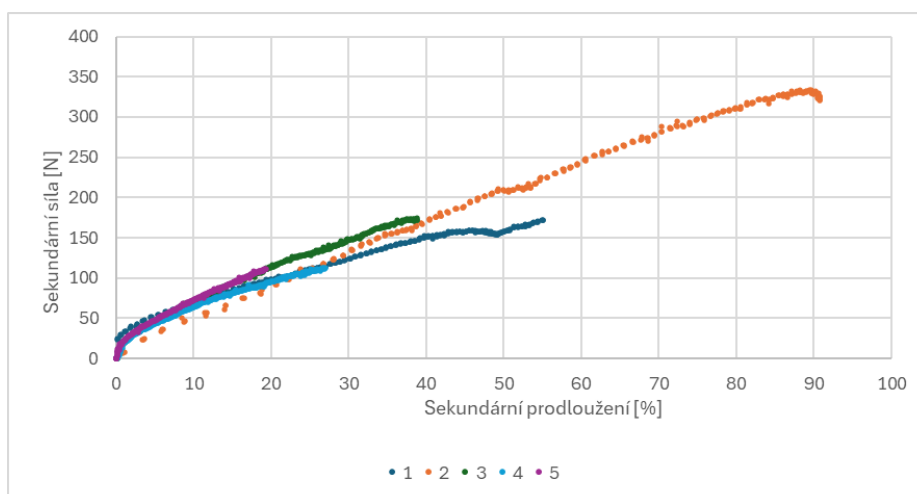
6.1.2 Geometrie 2: 40 x 49 mm, úhel 60°



Obrázek 40 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

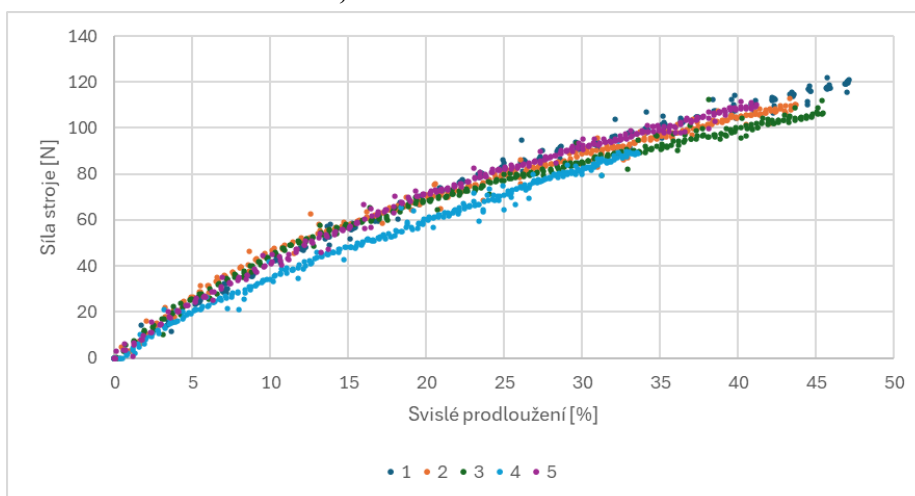


Obrázek 39 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

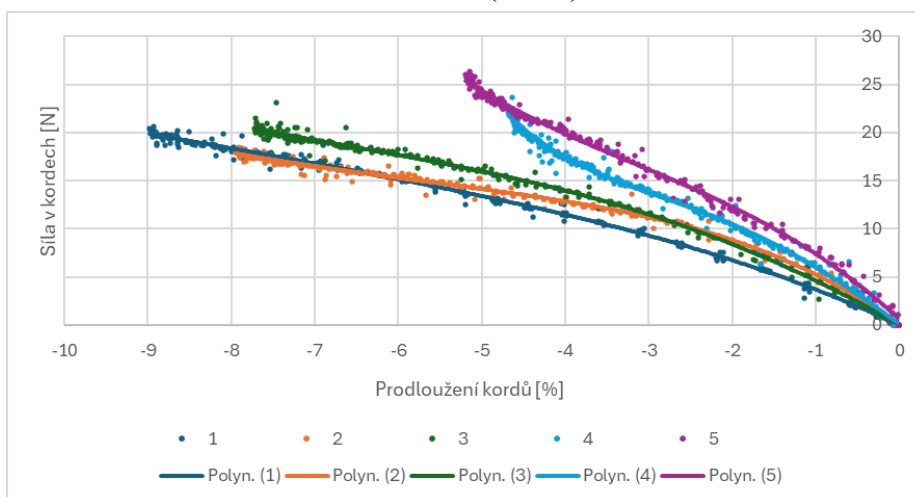


Obrázek 38 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

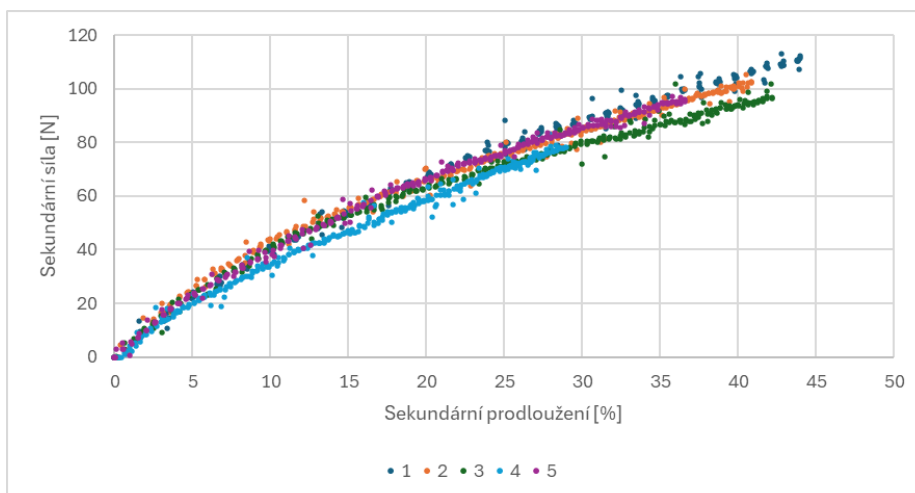
6.1.3 Geometrie 3: 40 x 110 mm, úhel 75°



Obrázek 43 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

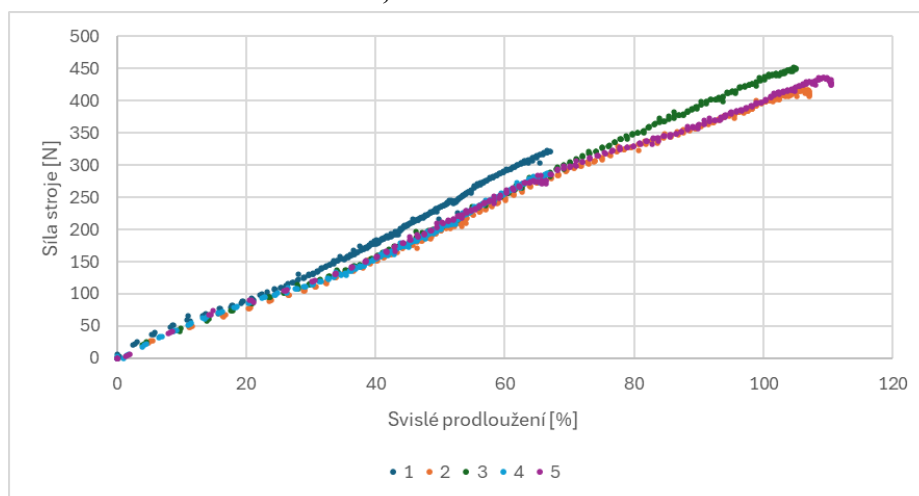


Obrázek 42 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

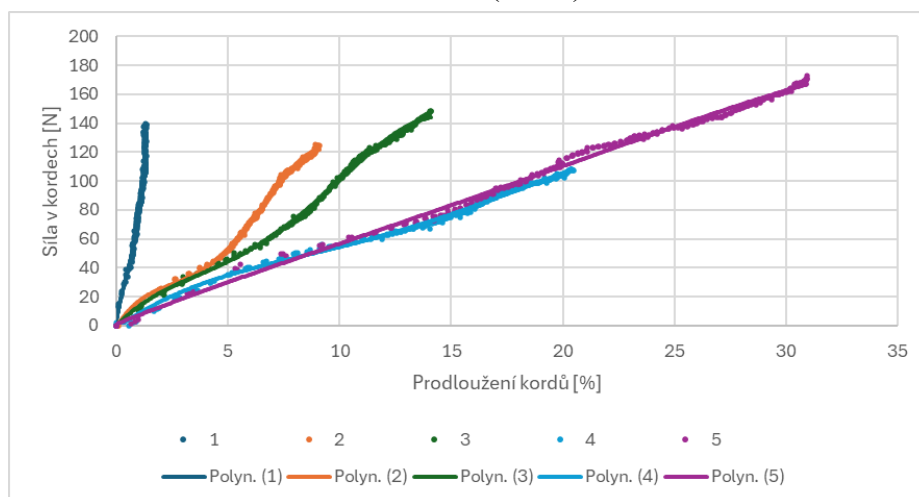


Obrázek 41 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

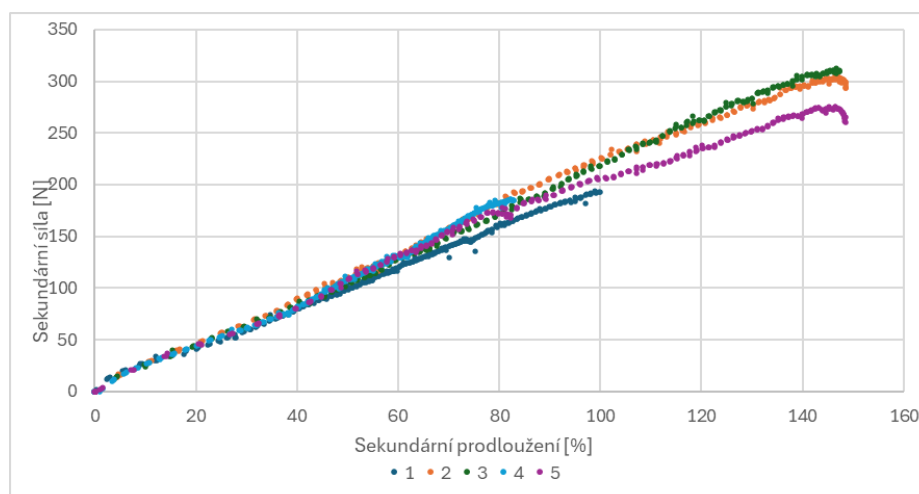
6.1.4 Geometrie 4: 27 x 26 mm, úhel 60°



Obrázek 46 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

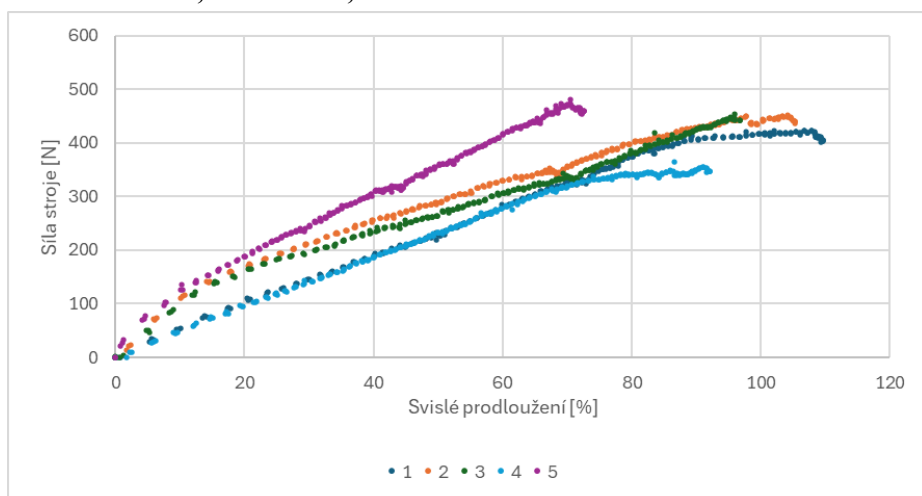


Obrázek 45 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

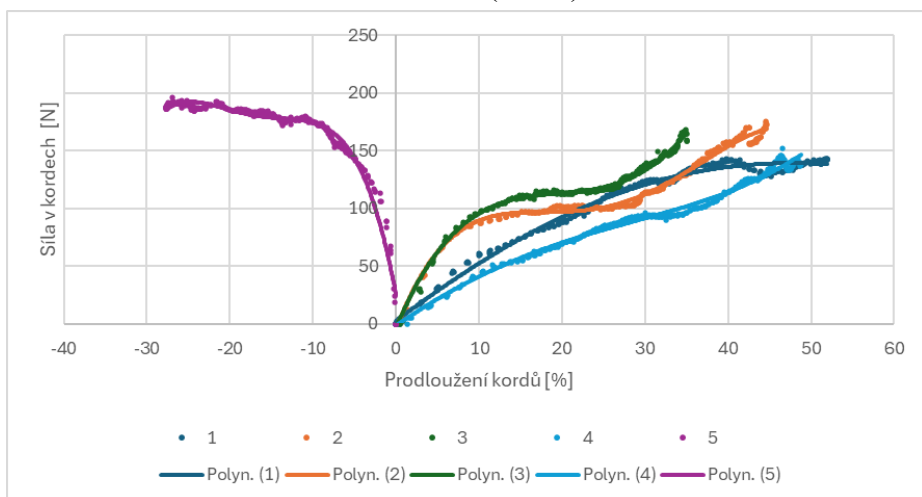


Obrázek 44 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

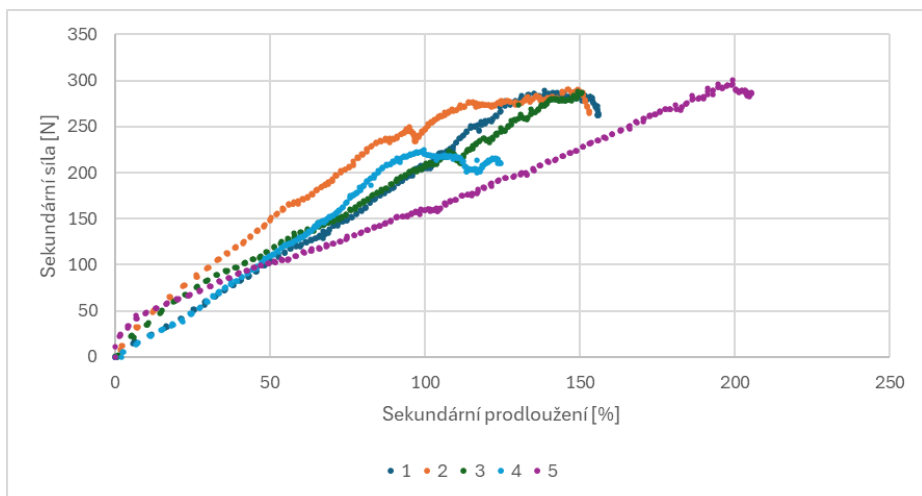
6.1.5 Geometrie 5: 17,5 x 26 mm, úhel 75°



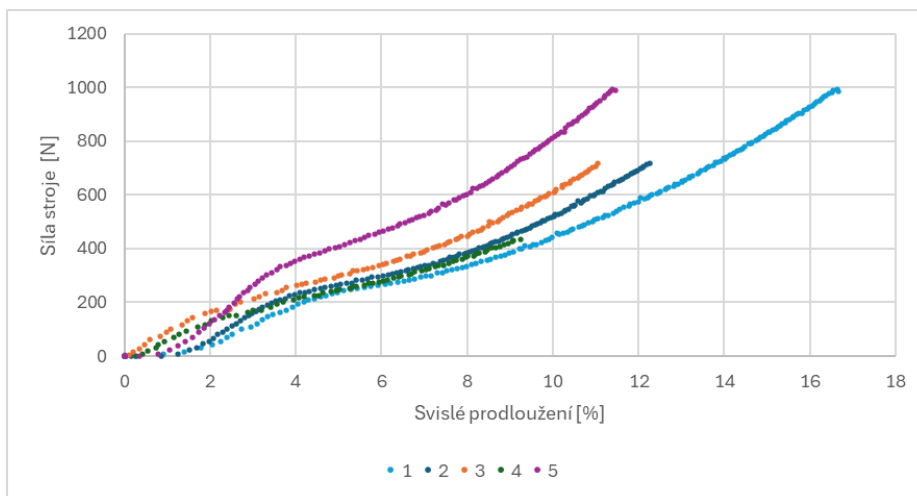
Obrázek 49 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)



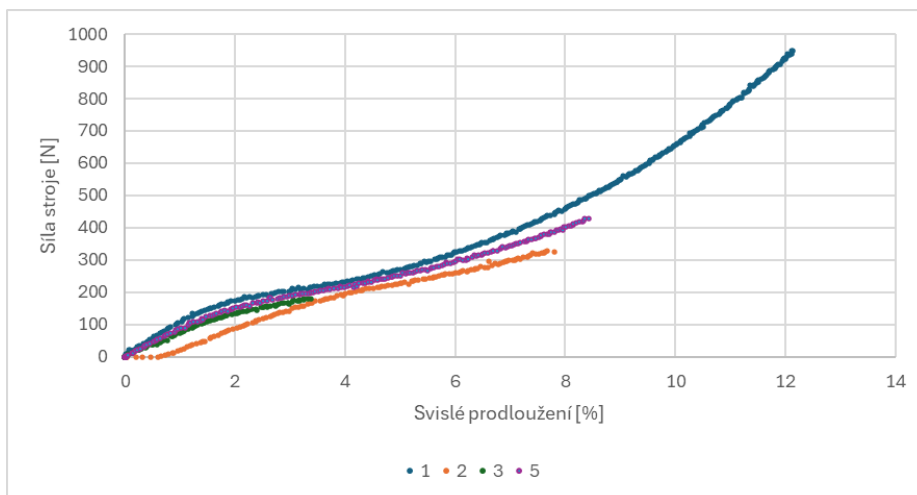
Obrázek 48 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů



Obrázek 47 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

6.1.6 Geometrie 6: 10 x 26 mm, úhel 90°

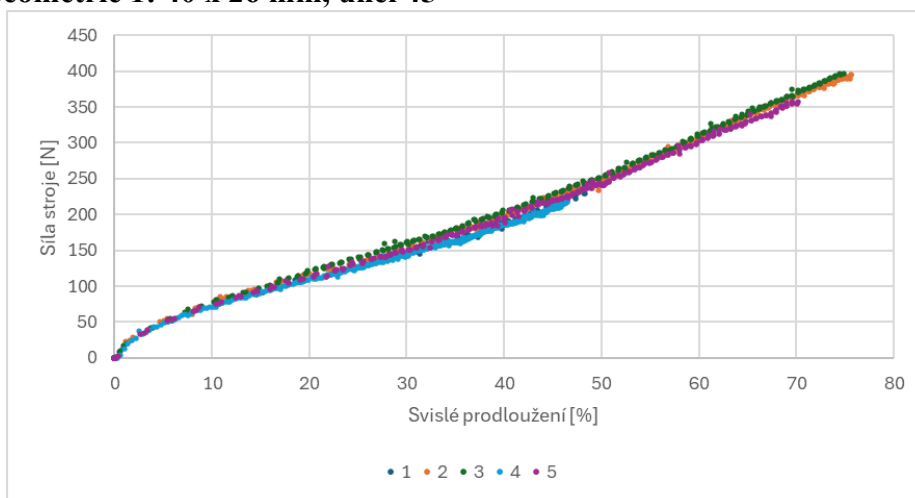
Obrázek 50 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

6.1.7 Geometrie 7: 10 x 110 mm, úhel 90°

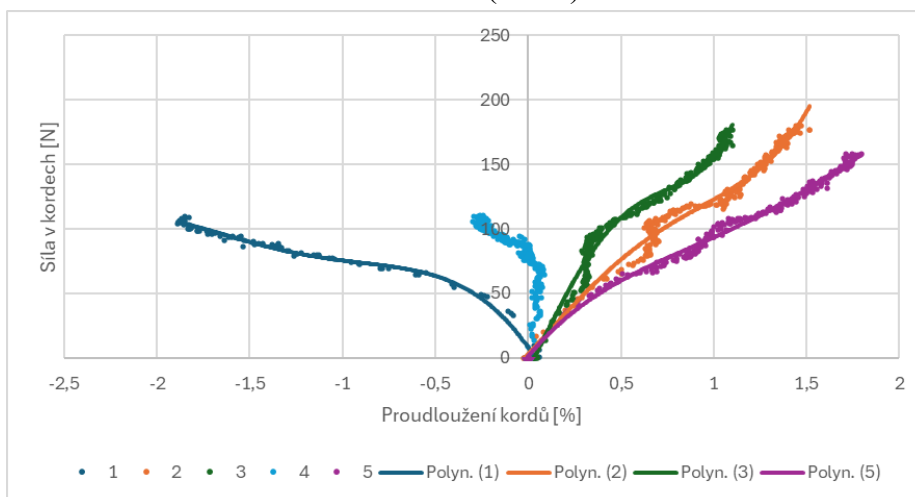
Obrázek 51 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

6.2 Zkušební tělesa s PES kordy

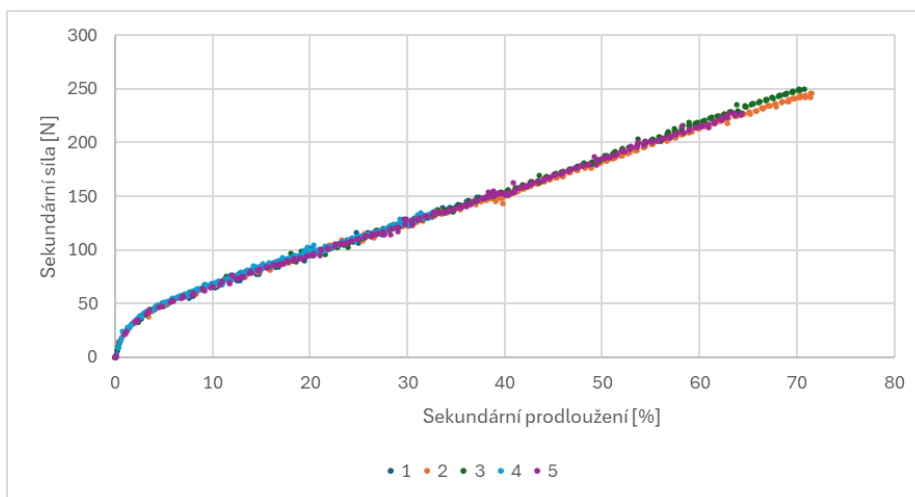
6.2.1 Geometrie 1: 40 x 26 mm, úhel 45°



Obrázek 53 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

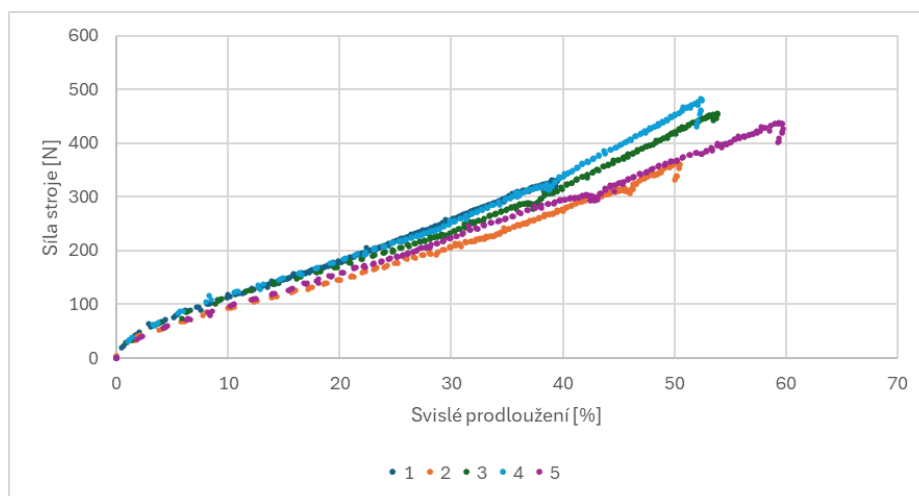


Obrázek 52 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

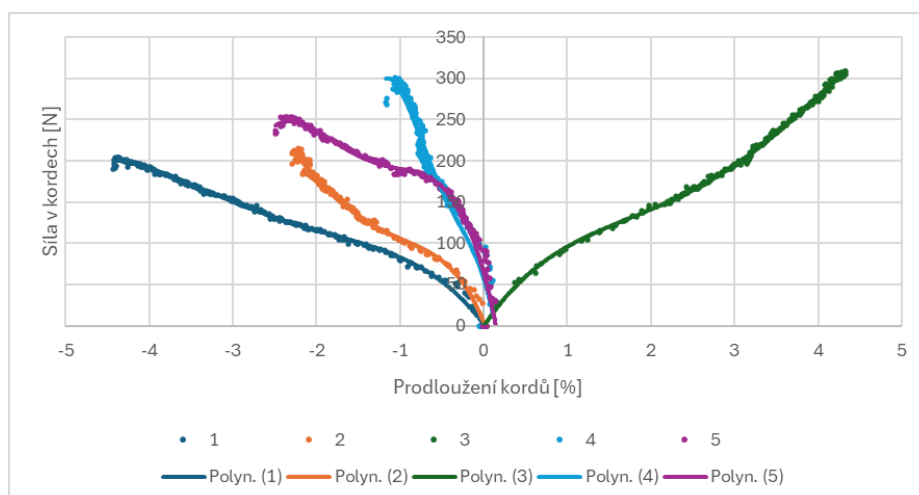


Obrázek 54 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

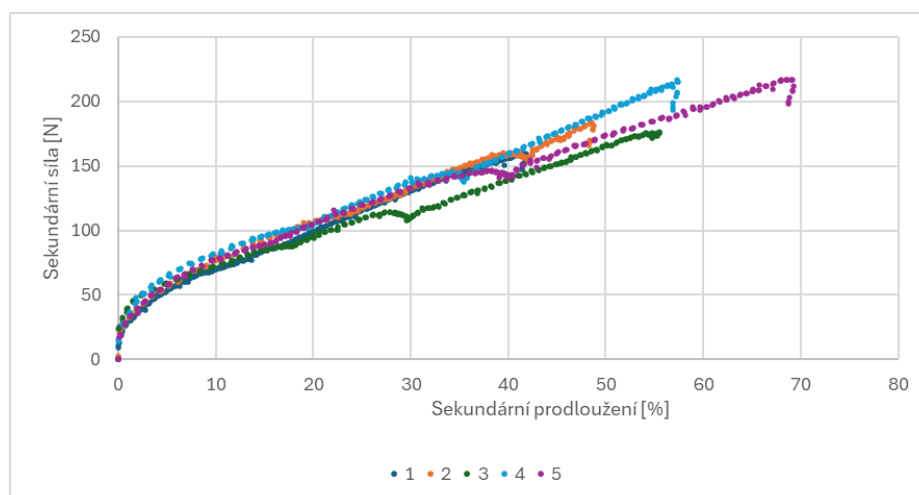
6.2.2 Geometrie 2: 40 x 49 mm, úhel 60°



Obrázek 57 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

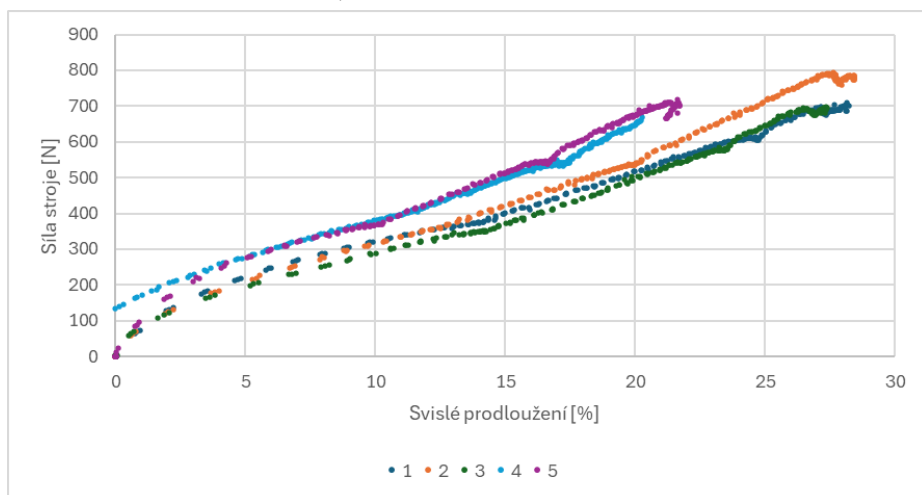


Obrázek 56 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

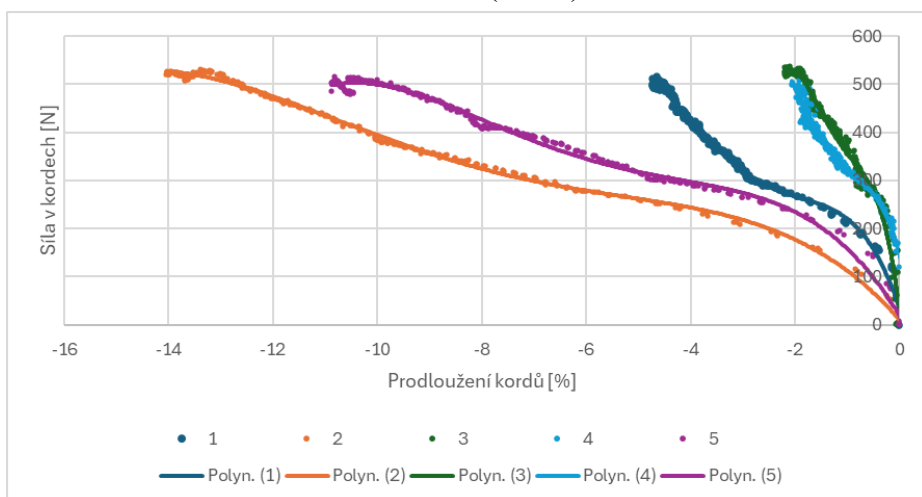


Obrázek 55 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

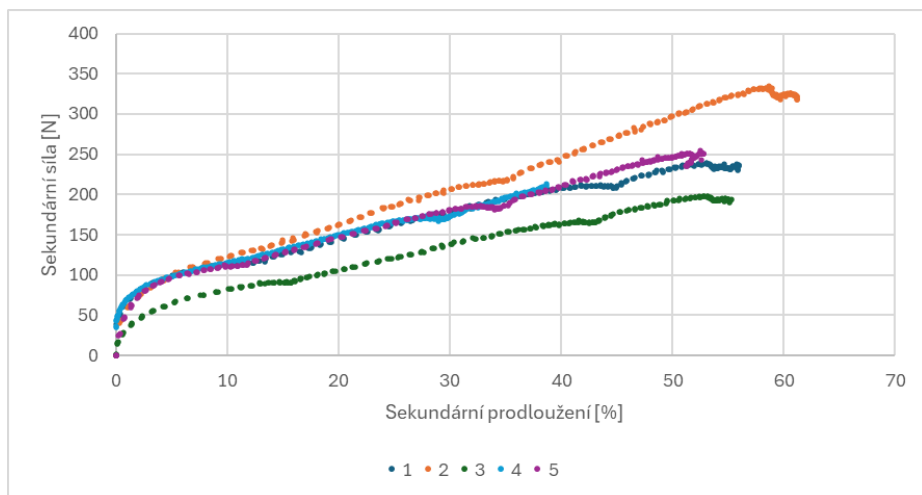
6.2.3 Geometrie 3: 40 x 110 mm, úhel 75°



Obrázek 60 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

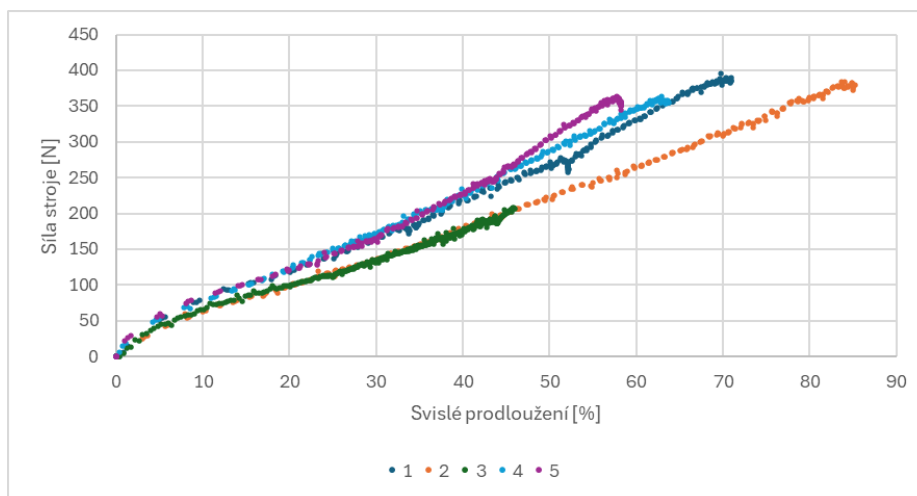


Obrázek 59 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

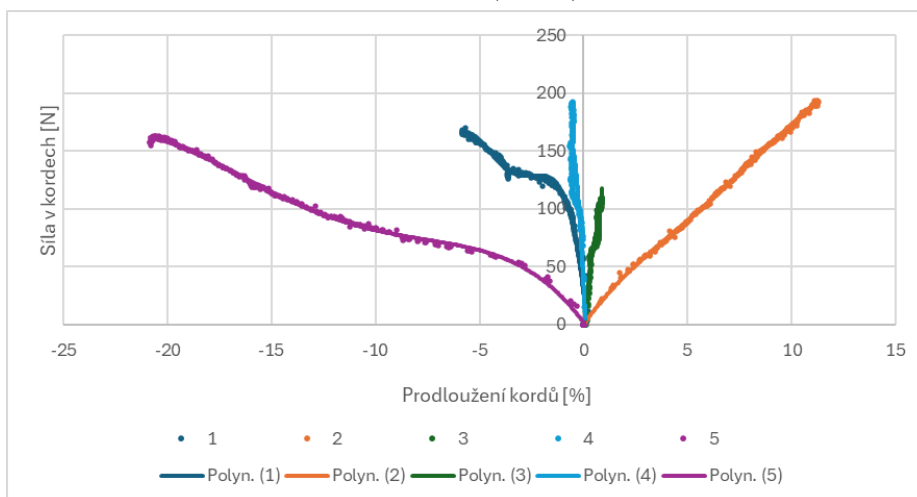


Obrázek 58 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

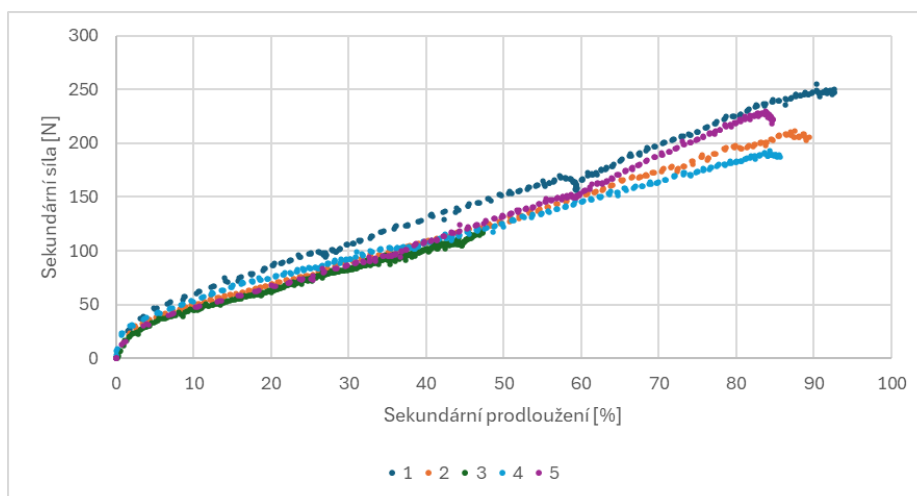
6.2.4 Geometrie 4: 27 x 26 mm, úhel 60°



Obrázek 63 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

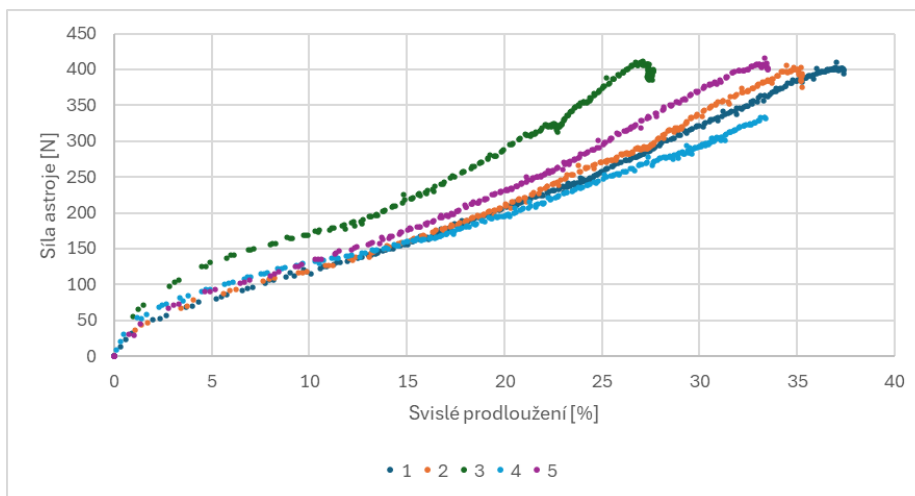


Obrázek 62 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů

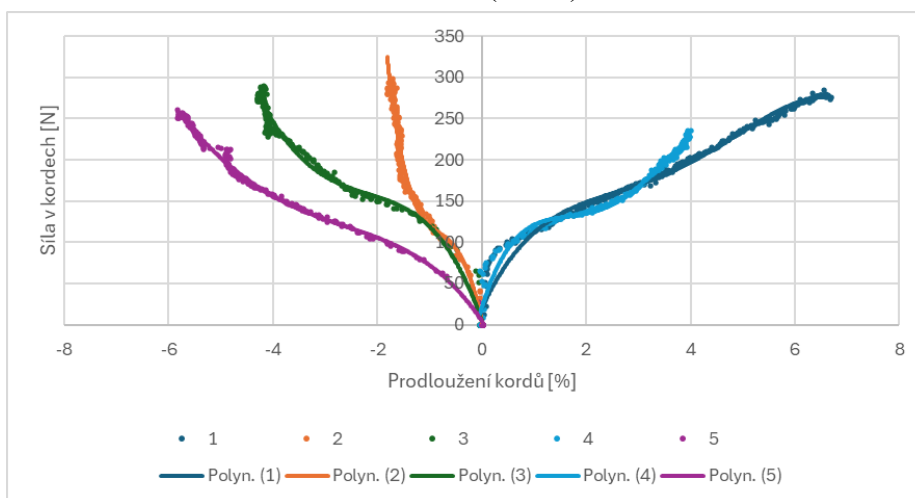


Obrázek 61 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

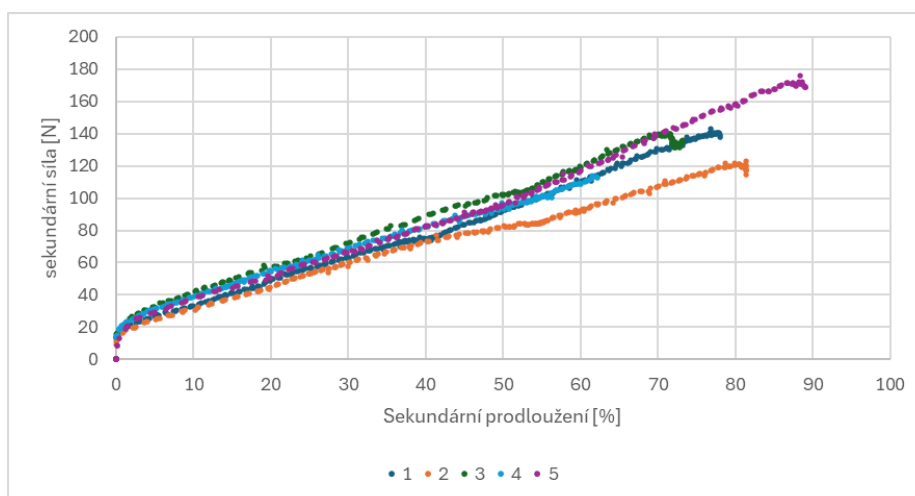
6.2.5 Geometrie 5: 17,5 x 26 mm, úhel 75°



Obrázek 66 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

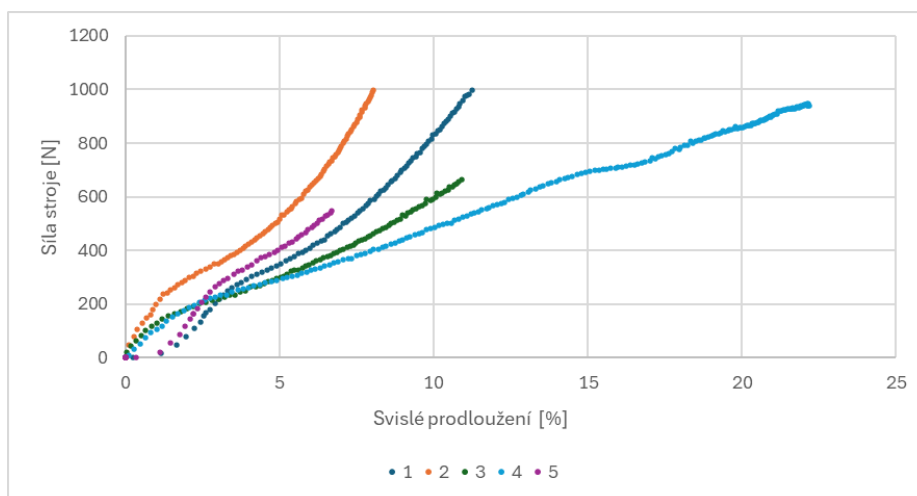


Obrázek 65 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů



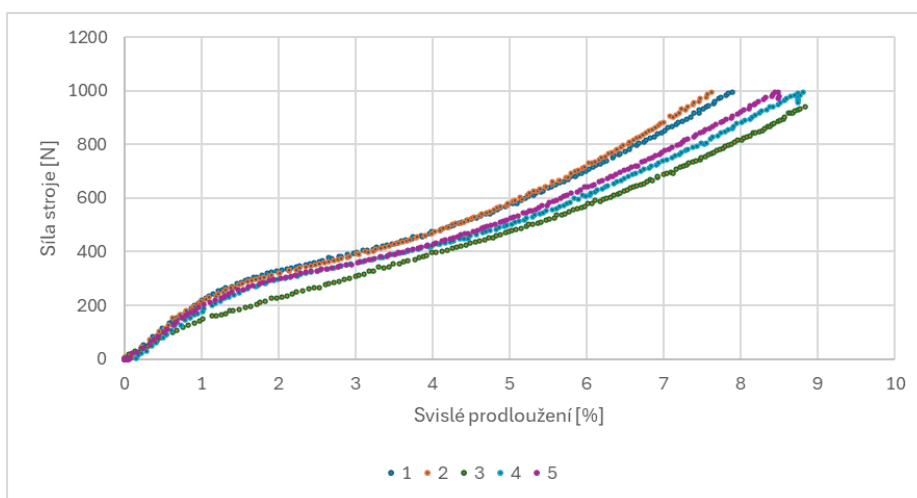
Obrázek 64 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení

6.2.6 Geometrie 6: 10 x 26 mm, úhel 90°



Obrázek 67 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

6.2.7 Geometrie 7: 10 x 110 mm, úhel 90°

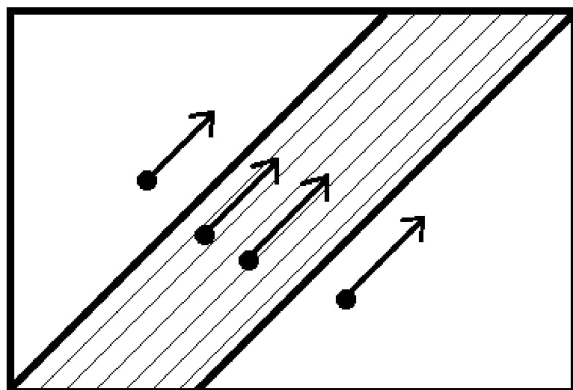


Obrázek 68 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)

6.3 Diskuze

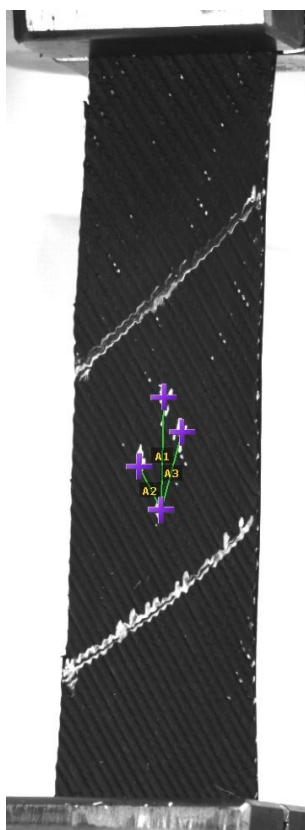
V každém zkušebním tělese se nacházel centimetrový pás kordu, díky čemuž byly tyto kordy upnuty v obou čelistech zkušebního stroje. Bude velmi záležet na to, jestli je měřený kord v tomto pásu, protože některé kordy se prodlužovaly a některé byly zase nuceny se zkracovat. Bylo by nutné přesně analyzovat, jak velkou roli to hraje a podle toho navrhnout

možnou úpravu geometrie zkušebního tělesa a metodiky měření (např. měřit ve více místech).



Obrázek 69 Kordy ve zkušebním tělese

Velký vliv bude mít taky to kdy začne zkušební těleso vyklouzávat z čelistí.



Obrázek 70 Zkušební
těleso v průběhu
zkoušky

Všechna měření se dají dále použít, protože byl celý průběh zkoušky zaznamenán kamerami. Díky tomu můžeme změřit například prodloužení v jiném kordu a nemusíme celou zkoušku opakovat.

ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce se věnuje kaučukům, různým druhům elastomerů, gumárenským směsím a přísadám, hyperelasticitě, hyperelastickým modelů a mechanickým zkouškám zaměřeným na zkoušení elastomerů.

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout metodyku zkoušení elastomerních kompozitů vyztužených kordy. Poté zjištění vlivu geometrie zkušební tělesa na vlastnosti kompozitní vrstvy a charakteristika chování elastomerů vyztužených kordy. Zkoušeny byly dva materiály vyztužené kordy, z kterých byly nastříhána zkušební tělesa.

Testování bylo prováděno v univerzitní laboratoři a za laboratorních podmínek. Zkoušeno bylo sedm různých geometrií od každé pět zkušebních těles pro oba materiály celkem tedy 70 zkušebních těles. Zkouška byla prováděna na zkušebním stroji SHIMADZU AGS při zatěžovací rychlosti 30 mm/min. Měření bylo prováděno systémem DIC se softwarem Mercury RT.

Ze všech provedených zkoušek byla zjištěna závislost síly stroje na prodloužení ve svislém směru, síly v kordě na prodloužení kordů a sekundární síly na sekundárním prodloužení. Všechny zjištěné hodnoty byly zaneseny do grafů. Z vyhodnocených výsledků že na výsledky má velký vliv geometrie zkušební tělesa protože se některá tělesa prodlužovala a některá zase zkracovala.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Jiří Maláč. Gumárenská technologie 2. Kaučuky1[online]. [cit. 2020-11-25]
Dostupné z: <https://docplayer.cz/84591-Jiri-malac-gumarenska-technologie-2-kaucuky-1-obsah.html>
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. ISBN 8072042483.
- [3] PREKOP, Štefan. *Gumárska technológia I*. Žilina: Žilinská univerzita, 1998. ISBN 8071004839.
- [4] STERN, Harold Jacob, 1967. *Rubber: natural and synthetic*. London: Maclaren.
- [5] Racek, J. elektronický Herbář, [online]. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.e-herbar.net/>
- [6] Publi.cz. (2025). *Kaučuky*. [online] Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/22.html>.
- [7] KUNRT, František, 1957. *Gumování textilu*. Praha: SNTL.
- [8] KORDÁRNA Plus a.s. (2017). *Kordové Tkaniny*. [online] Dostupné z: <https://www.kordarna.cz/kordove-tkaniny/> [Accessed 15 May 2025]
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav, 1990. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. Praha: VŠCHT Praha v Čs. redakci VN MON. ISBN 8070800771.
- [10] Jiří Maláč. Gumárenská technologie 4. Směsi1 Kaučuky[online]. [cit. 2020-11-29] Dostupné z: <https://adoc.pub/jii-mala-gumarenska-technologie-4-smesi-1-obsah.html>
- [11] Rubena.eu. (2024). *Gumárenské Směsi :: Rubena.eu*. [online] Dostupné z: <https://www.rubena.eu/cz/produkty/gumarenske-smesi/> [Accessed 15 May 2025].
- [12] DUCHÁČEK, Vratislav, 2010, c2011. *Změkčovadla*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín. ISBN 9788002022879.
- [13] DUCHÁČEK, Vratislav, 2017. *Antidegradanty*. ISBN 9788002027294.
- [14] DUCHÁČEK, Vratislav, 2003. *Vulkanizační činidla*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín. ISBN 8002015258.

- [15] DUCHÁČEK, Vratislav, 2013. *Urychlovače vulkanizace*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín. ISBN 9788002024293.
- [16] DVOŘÁK, Zdeněk a JAVOŘÍK, Jakub, 2009. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín. ISBN 9788002021551.
- [17] Javořík, J. Zkoušení rovnoměrné rovinné napjatosti elastomerů, UTB ve Zlíně, 2005, [učební text].
- [18] Dofrmann, Al. Constitutive Models for Rubber, Rotterdam: Brookfield, 1999, ISBN 90-5809-113-9
- [19] Gent, A., N. Engineering with rubber. Munich: Carl Hauser Verlag, 2001. ISBN 3 446-21403-8
- [20] Smith, L. P. The Language of Rubber: an introduction to the specification and testing of elastomers, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993, ISBN 0-7506-1413-7
- [21] Jakub Javorik and Manas, D. (2011). The Specimen Optimization for the Equibiaxial Test of Elastomers. [online] pp.121–124. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261844574_The_specimen_optimization_for_the_equibiaxial_test_of_elastomers?fbclid=IwAR1ZGBk96dA6D1enT7CTDaLotnvEZtrLAXWVPhsty6DhNtINMjyo88OQdeY.
- [22] Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Springer US, 2009, 321s. ISBN 978-0-387-78746-6
- [23] EIRICH, F. R., Burak ERMAN a James E. MARK, ed. Science and technology of rubber. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005, xvii, 743 s. ISBN 0124647863.

- [24] DAS GUPTA, Saikat, Rabindra MUKHOPADHYAY, Krishna C. BARANWAL a Anil K. BHOWMICK. Reverse engineering of rubber products: concepts, tools, and techniques. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2014], xviii, 339 s. ISBN 978-0-8493-7316-9.
- [25] Kohnke, P. ANSYS –Theory reference. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 1998. 965s.
- [26] Digital Image Correlation [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110702352>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení kaučuků	13
Obrázek 2 Chemický vzorec polyisoprenu [1]	13
Obrázek 3 Hevea brasiliensis (kaučukovník brazilský) [5].....	14
Obrázek 4 Tabulka nejčastěji používaných kaučuků [6]	15
Obrázek 5 Výrobky z kaučuků [6].....	15
Obrázek 6 Chemický vzorec SBR [1].....	15
Obrázek 7 Chemický vzorec BR [1].....	16
Obrázek 8 Chemický vzorec IR [1]	17
Obrázek 9 Chemický vzorec EPM [1]	17
Obrázek 10 Tabulka speciálních kaučuků [6].....	18
Obrázek 11 Výrobky ze speciálních kaučuků [6]	18
Obrázek 12 Chemický vzorec CR [1].....	19
Obrázek 13 Chemický vzorec NBR [1]	20
Obrázek 14 Chemický vzorec IIR [1].....	21
Obrázek 15 Příklad výrobků ze silikonového kaučuku [6].....	22
Obrázek 16 Gumárenská směs [11]	25
Obrázek 17 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [17]	29
Obrázek 18 Jednoosá napjatost [17]	36
Obrázek 19 Dvouosá napjatost [17].....	36
Obrázek 20 Metoda dvouosého tahu nafukováním zkušební tělesa [17]	37
Obrázek 21 Čistý smyk [17]	37
Obrázek 22 Zkušební těleso 1	39
Obrázek 23 Zkušební těleso 2.....	39
Obrázek 24 Zkušební těleso 3.....	40
Obrázek 25 Zkušební těleso 4.....	40
Obrázek 26 Zkušební těleso 5.....	41
Obrázek 27 Zkušební těleso 6.....	41
Obrázek 28 Zkušební těleso.....	42
Obrázek 29 Zkušební těleso 7.....	42
Obrázek 30 Zkušební stroj.....	43
Obrázek 31 Sestava DIC	44
Obrázek 32 Zkušební těleso při zkoušce	45
Obrázek 33 Rozklad síly do dvou složek.....	46
Obrázek 34 Celkový průběh zkoušky	47

Obrázek 35 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	48
Obrázek 36 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	48
Obrázek 37 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	48
Obrázek 38 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	49
Obrázek 39 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	49
Obrázek 40 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	49
Obrázek 41 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	50
Obrázek 42 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	50
Obrázek 43 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	50
Obrázek 44 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	51
Obrázek 45 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	51
Obrázek 46 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	51
Obrázek 47 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	52
Obrázek 48 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	52
Obrázek 49 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	52
Obrázek 50 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	53
Obrázek 51 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	53
Obrázek 52 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	54
Obrázek 53 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	54
Obrázek 54 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	54
Obrázek 55 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	55
Obrázek 56 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	55
Obrázek 57 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	55
Obrázek 58 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	56
Obrázek 59 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	56
Obrázek 60 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	56
Obrázek 61 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	57
Obrázek 62 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	57
Obrázek 63 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	57
Obrázek 64 Graf závislosti sekundární síly na sekundárním prodloužení.....	58
Obrázek 65 Graf závislosti síly v kordech na prodloužení ve směru kordů	58
Obrázek 66 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	58
Obrázek 67 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	59
Obrázek 68 Graf závislosti síly stroje na prodloužení ve směru namáhání (svisle)	59
Obrázek 69 Kordy ve zkušebním tělese.....	60

Obrázek 70 Zkušební těleso v průběhu zkoušky	60
--	----

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Informace o stroji	43
Tabulka 2 Informace o zařízení	44

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

μ	Smykový modul [Pa]
μ_i	Materiálová konstanta (Neo-Hookean, Arruda-Boyce, Ogden) [Pa]
ACM	Akrylátový kaučuk
BR	Butadienový kaučuk
CFRP	Uhlíkovými vlákny tvrzené plasty
C_{ij}	Složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru
c_{ij}	Materiálová konstanta (Polynom. model, Yeoh, Mooney-Rivlin) [Pa]
CR	Chloroprenový kaučuk
DIC	Korelace digitálního obrazu
dsk	Díly na sto dílů kaučuků
E	Modul pružnosti v tahu nebo tlaku [MPa]
EPDM	Ethylen-propylen-dienový kaučuk
EPM	Ethylen-propylenový kaučuk
F	Síla [N]
FPM	Fluorouhlíkový kaučuk
Gs	Modul pružnosti ve smyku [Pa]
I	Deformační invariant
IR	Isoprenový kaučuk
K	Objemový modul pružnosti [Pa]
k	Boltzmannova konstanta
l_0	Původní délka [m]
l_i	Deformovaná délka [m]
n	Počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu
NBR	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
p	Nespecifikovaný tlak [Pa]

PA	Polyamid
PES	Polyester
Phr	Parts per hundred rubber
Q	Silikonový kaučuk
r	Poloměr [m]
S_0	Původní průřez zkušebního tělesa [m ²]
SBR	Butadien-styrenový kaučuk
S_{ij}	Složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí [Pa]
t	Tloušťka [m]
T	Absolutní teplota [K]
UV	Ultrafialové záření
W	Měrná deformační energie [J/m ³]
α_i	Materiálová konstanta
δ_{ij}	Kronekerovo delta
ε	Poměrné prodloužení [-]
λ	Poměrné protažení [-]
ν	Poissonovo číslo
σ	Napětí [Pa]