

Mechanické vlastnosti vybraných elastomerů

Richard Zezula

Bakalářská práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Richard Zezula**
Osobní číslo: **T11305**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti vybraných elastomerů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Literární přehled**
- 2. Metodika měření**
- 3. Vlastní měření**
- 4. Vyhodnocení výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

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

Ústav výrobního inženýrství

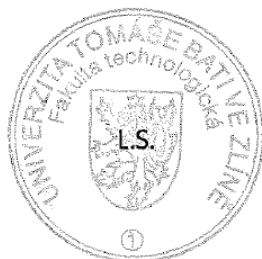
Datum zadání bakalářské práce: **30. ledna 2015**

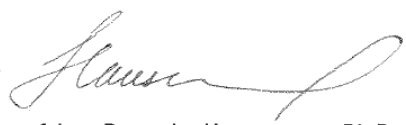
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2015**

Ve Zlíně dne 9. února 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: ZEZULA RICHARD

Obor: T2

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 16.5.2015



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá testováním hyperelastických materiálů pro čistý smyk a dvouosou napjatost, které jsou používány pro výrobu pneumatik. Porovnává různé typy materiálů a vyhodnocuje pomocí určitých metod.

V teoretické části je pojednáno o hyperelastických materiálech a jejich mechanickém chování. V praktické části se práce věnuje zkoušení těchto materiálů a popisu zkoušky.

Klíčová slova: hyperelasticita, čistý smyk, dvouosá napjatost, elastomer, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The aim of this study is testing pure shear and biaxial tension of hyperelastic materials used in tyre production, compare different types of materials and evaluate them by using specific methods.

Hyperelastic materials and their mechanical behavior are discussed in the theoretical part. Testing and description of the tests are described in the practical part.

Keywords: hyperelasticity, pure shear, biaxial stress, elastomer, mechanical properties

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D, za trpělivost, dobrý přístup a poskytnutí odborných konzultací při řešení této práce, dále bych chtěl poděkovat doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi, za pomoc s vyhodnocením grafů.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OBECNÝ POPIS ELASTOMERŮ	12
1.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ KAUCŮKŮ	12
1.1.1 PŘÍRODNÍ KAUCŮKY - NR	12
1.1.2 SYNTETICKÉ KAUCŮKY	14
1.1.2.1 BUTADIENOVÝ KAUCŮK - BR	14
1.1.2.2 BUTADIENSTYRENOVÝ KAUCŮK - SBR	14
1.1.2.3 CHLOROPRENOVÝ KAUCŮK - CR.....	16
1.1.2.4 ISOPRENOVÝ KAUCŮK - IR	17
1.1.2.5 SILIKONOVÝ KAUCŮK	18
1.2 GUMÁRENSKÉ SMĚSI	19
1.2.1 VULKANIZAČNÍ ČINIDLA	19
1.2.2 URYCHLOVAČE.....	19
1.2.3 AKTIVÁTORY A RETARDÉRY	20
1.2.4 ZMĚKČOVADLA	20
1.2.5 ANTIDEGRADANTY	21
1.2.6 PLNIVA A ZTUŽOVADLA	22
1.2.7 OSTATNÍ PŘÍSADY	22
1.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	24
1.3.1 OBECNÁ TEORIE ELASTICKÝCH DEFORMACÍ.....	24
1.3.2 OBECNÝ VZTAH MEZI NAPĚTÍM A DEFORMACÍ.....	25
1.3.3 JEDNOOSÁ NAPJATOST	25
1.3.4 DVOUOSÁ NAPJATOST	26
1.3.5 ČISTÝ SMYK	27
1.3.6 PRŮBĚH MECHANICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ.....	28
1.3.7 ZKOUŠENÍ HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ.....	29
1.3.8 PŘEHLED MATERIÁLOVÝCH MODELŮ.....	29
1.3.9 KATEGORIE MODELŮ.....	30

II	PRAKTICKÁ ČÁST	34
2	CÍL PRÁCE	35
2.1	ZKUŠEBNÍ MATERIÁL	35
2.2	METODIKA MĚŘENÍ	35
2.2.1	ČISTÝ SMYK	35
2.2.1.1	POSTUP MĚŘENÍ	35
2.2.1.2	ZKUŠEBNÍ VZORKY	36
2.2.1.3	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	36
2.2.1.4	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	37
2.2.2	DVOUOSÁ NAPJATOST	38
2.2.2.1	POSTUP MĚŘENÍ	38
2.2.2.2	ZKUŠEBNÍ VZORKY	38
2.2.2.3	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	39
2.2.2.4	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	39
3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	40
3.1	MATERIÁL C	41
3.2	MATERIÁL D	42
3.3	MATERIÁL E	43
3.4	MATERIÁL F	44
3.5	MATERIÁL G	45
3.6	MATERIÁL H	46
3.7	MATERIÁL I	47
3.8	NAPĚTÍ MATERIÁLŮ PŘI URČITÝCH MODULECH	48
	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	52
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
	SEZNAM OBRÁZKŮ	58
	SEZNAM TABULEK	60
	SEZNAM PŘÍLOH	61

ÚVOD

Pod pojmem kaučuk se nám vybaví představa pružné, tažné a ohebné hmoty, která je schopna značně se deformovat i malou silou a po uvolnění vnější síly se vrátit do původního stavu. Hmoty mající kaučukovité vlastnosti při normální teplotě souhrně nazýváme elastomery. Elastomery v dnešní době stále více pronikají a nachází uplatnění v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti. Jsou využívány jako nárazové a dopadové absorbéry energie, tlumiče vibrací, izolátory a v neposlední řadě dominantní odvětví oblasti pryže a to výroba pneumatik automobilů.

Hyperelastické materiály, označované jako elastomery, patří do speciální třídy polymerů, která zahrnuje přírodní a syntetické pryže. Slovo pryž původně znamenalo materiál získaný ve formě latexu ze stromů *Hevea brasiliensis* (kaučokovník brazilský).

Elastomerní materiály mají výrazně odlišné vlastnosti než kovy a nelze u nich užít Hookův zákon z důvodu jejich vysoké nelinearity při namáhání. Aby bylo možné vyhodnotit chování těchto materiálů při působení napětí a deformací, byla vytvořena řada materiálových modelů založená na potenciálu deformační energie, které jsou potřebné pro vyhodnocení vlastností elastomerů.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÝ POPIS ELASTOMERŮ

Kaučuk řadíme mezi elastomery a je to pružná, tažná a ohebná hmota, mající schopnost být vulkanizací převedena na pryž. Kaučukovité hmoty se mohou značně deformovat i malou silou, přičemž se po uvolnění této síly poměrně rychle vrací do původních rozměrů.

Kaučuk obsahuje velké množství dlouhých řetězců molekul. Vzájemné působení makromolekul má vliv na jejich vzájemné uspořádání ve hmotě, způsob tvarování a konečné vlastnosti hmoty.

Nejdůležitější vlastnosti kaučuku jsou:

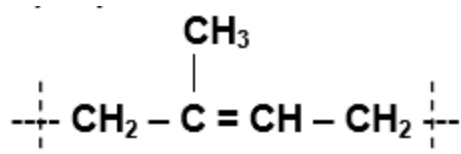
- Teplota skelného přechodu T_g , při kterém přechází kaučuk ze stavu kaučukovitého do stavu sklovitého.
- Viskozita, charakterizuje zpracovatelnost kaučuku, tj. schopnost být hněten a dále zpracováván. Je závislá na molekulové hmotnosti a její distribuci; je závislá na teplotě a s jejím růstem klesá.

Pokud vzniknou chemickou reakcí v kaučuku vazby mezi sousedními molekulami, stává se již z kaučuku technicky využitelný materiál nazývaný pryž, který má schopnost velkých vratných deformací i při vyšším rozsahu teplot. Tato chemická reakce se odborně nazývá vulkanizace

1.1 Základní rozdělení kaučuků

1.1.1 Přírodní kaučuky - NR

Kaučuk se získává z latexu, což je koloidní disperze cis-1,4-polyisoprenu ve vodném roztoku. Kaučuk je v něm rozptýlen ve formě částic o průměru 0,05 až 5 μm . Vše se nachází v buňkách kůry stromu *Hevea Brasiliensis*. Kromě cca 30 % kaučuku obsahuje latex také 1 % proteinů, 1 % lipidů, 1 % uhlohydrátů a jiné látky. [1]



Obr. 1 cis-1,4-polyisopren

Čepovat se začíná u šestiletých až osmiletých stromů a podle zkušenosti lze čepovat asi 30 let, přičemž do dvaceti let výtěžky stále mírně stoupají. [2]



Obr. 2 Čepování latexu

Během několika hodin působením bakterií čerstvý latex samovolně koaguluje. Je nutné latex stabilizovat pro uchování v tekutém stavu. Nejpoužívanější stabilizací je použití amoniaku, kterého se přidává 0,3 až 0,7% z hmotnosti latexu, buď v roztoku nebo plynném stavu. Zásadní pro správnou stabilizaci je přidání stabilizačního činidla ihned po načepování latexu.

Kvůli vysokému obsahu vody v čepovaném latexu přímo na plantážích probíhá koncentrace, což umožňuje zlevnit jeho dopravu a zpracovatelnost. Nejpoužívanější způsoby jsou odstředování, odpařování, rozvrstvování nebo elektrodekantací. [3]

Přírodní kaučuk se zpracovává především na pneumatiky, kde se uplatňuje jeho vysoká elasticita, dobré dynamické vlastnosti a snadné zpracování při hromadné výrobě. Při výběru druhu přírodního kaučuku se kromě výše uvedených vlastností hodnotí především čistota, stejnoměrnost a cena.

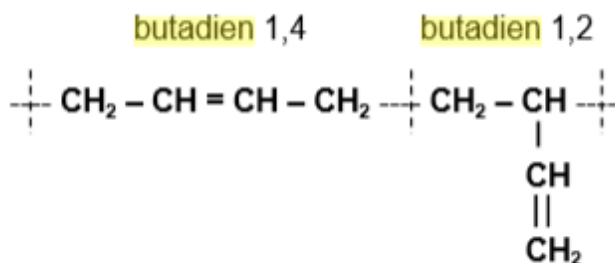
1.1.2 Syntetické kaučuky

Hlavní rozdíl mezi přírodním a syntetickým kaučukem je v technologii jejich výroby. Zatímco přírodní kaučuk se získává pouze ze stromu *Hevea Brasiliensis*, syntetické kaučuky se vyrábí pouze chemickou cestou. K ní jsou zapotřebí monomery, které jsou následně podrobeny polymeraci. [4]

Syntetických kaučuků je gumárenském průmyslu k dispozici nepřeberné množství. Nejvýznamnější syntetické kaučuky používané při výrobě pneumatik jsou SBR, BR, IIR a IR.

1.1.2.1 Butadienový kaučuk - BR

Převážnou většinu butadienových kaučuků tvoří stereoregulární polybutadieny vyráběné roztokovou polymerací v přítomnosti Zieglerových-Nattových katalyzátorů. Jsou charakterizovány obsahem cis-1,4 konfigurace převyšujícím 90 %, většinou výhnamně. Vedle nich se stále ještě vyrábějí i historicky starší roztokové typy polymerované s použitím lithných katalyzátorů, jejichž stereoregularita je podstatně nižší. Minoritní emulzní suché kaučuky a latexy. Zvláštní skupinou jsou relativně nízkomolekulární, kapalné polybutadieny. [15]



Obr. 3 Butadienový kaučuk (BR)

1.1.2.2 Butadienstyrenový kaučuk - SBR

Butadien a styren patří k monomerům, které ochotně polymerují a kopolymerují nejrůznějšími mechanismy a způsoby. Proto lze na základě kopolymerů butadienu a styrenu vyrobit dlouhou řadu makromolekulárních látek, a to jak plastů, tak elastomerů. Proto také ani množinu butadien-styrenových kaučuků nelze jednoznačně specifikovat bez její klasifikace na řadu podmnožin. Jsou celosvětově nejzpracovávanějšími kaučuky. Typy pro všeobecné použití obsahují většinou 23 až 25 % styrenu. K jejich plnému využití je

Butadien-styrenové kaučuky jsou, podobně jako přírodní, nenasycené a prakticky nepolární. Proto jejich odolnost vůči rozpouštědlům (kapalinám) i kyslíku a ozonu je velmi podobná. Podobná je i jejich chemická odolnost, a to jak měkké, tak tvrdé pryže. Rozdíl je však v působení zvýšených teplot. Zatímco v pryžích z přírodního kaučuku převládají štěpné reakce, v pryžích na základě kaučuku butadien-styrenových převládají reakce síťovací v důsledku přítomnosti vinylových skupin na polymerních řetězcích, pocházejících z 1,2 – adice molekul butadienu při jeho kopolymeraci se styrenem. Chovají se totiž podobně jako vinylové monomery, ale jejich “polymerace“ vede v tomto případě k dodatečnému síťování. Proto vulkanizáty SBR stárnutím tvrdnou. Jejich tepelná odolnost je však (zejména za statických podmínek) podstatně lepší než pryži z přírodního kaučuku.

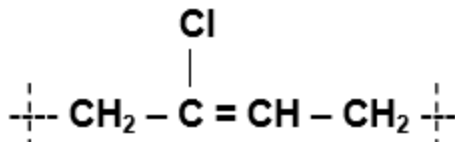
Butadien-styrenové kaučuky se při skladbě kaučukových směsí používají jak samostatně, tak v kombinaci s přírodním nebo butadienovým kaučukem – třeba ke zlepšení zpracovatelnosti (např. konfekční lepivosti) směsí nebo fyzikálně-mechanických vlastností jejich vulkanizátů, či v kombinaci s butadien-akrylonitrilovými kaučuky k získání jisté olejovzdornosti pryže. Naopak, přídavek menšího množství SBR do směsí na základě přírodního kaučuku lze využít ke zlepšení tepelné odolnosti pryže. Masově vyráběné butadien-styrenové kaučuky nastavované olejem se v antikorozi ochraně prakticky nepoužívají pro příliš vysoký obsah změkčovadla (nastavovacího oleje)

Používané vulkanizační systémy jsou analogické jako při skladbě směsí z přírodního kaučuku. I tvrdou pryž lze z SBR vyrobit obdobně jako z přírodního kaučuku. Vulkanizuje se všeobecně sírou, její dávkování pro měkkou pryž bývá 1,5 až 2 dsk, výjimečně více. Dávkování urychlovačů bývá větší než u NR (1 až 2 dsk), protože SBR, zejména emulzní, vulkanizuje vzhledem k přítomnosti organických kyselin pomaleji. Proti směsím z přírodního kaučuku nemají butadien-styrenové tendenci k reverzi, ale vykazují naopak často tzv. krácející modul.

1.1.2.3 Chloroprenový kaučuk - CR

Vyrábějí se emulzní radikálovou polymerací za teplot od 10 do 45 °C, analogicky jako kaučuky butadien-styrenové a butadien-akrylonitrilové. Za těchto podmínek obsahují polychloroprenové řetězce kolem 85 % strukturních jednotek vázaných v konfiguraci trans-1,4. Proto chloroprenové kaučuky samovolně krystalují. O rychlosti jejich

krystalizace rozhoduje rozvětvenost makromolekulárních řetězců, která stoupá se stoupající teplotou polymerace. [15]



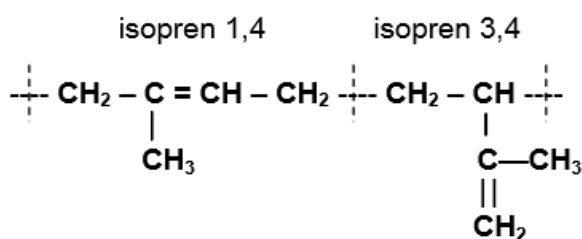
Obr. 5 Chloroprenový kaučuk (CR)

Ve srovnání se syntetickými kaučuky pro všeobecné použití mají CR tyto vlastnosti:

- zlepšenou odolnost proti degradacím (ozonu a slunečnímu záření)
- zvýšenou odolnost proti olejům a jiným chemikáliím
- vynikající houževnatost
- zvýšenou odolnost proti hoření.

1.1.1.4 Isoprenový kaučuk - IR

Jsou to jediné syntetické kaučuky, které by mohly být označovány jako umělé, neboť přírodní cis-1,4-polyisopren existuje (přírodní kaučuk). Vyráběly se původně ve dvou základních druzích, lišících se obsahem adice cis-1,4. Historicky starší druh o 92 % adice cis-1,4 se vyráběl roztokovou polymerací katalyzovanou alkyllithiovými sloučeninami. Jeho výrobu zahájila v Holandsku firma Shell v roce 1960 a prodávala jej pod označením Cariflex IR.



Obr. 6 Isoprenový kaučuk (IR)

Dražší druh syntetického izoprenového kaučuku s 96 % adice cis-1,4 uvedla na trh americká firma Goodyear v roce 1962 pod obchodním označením Natsyn. Vysokou

strukturní čistotu poskytují stereospecifické katalyzátory Zieglerova-Nattova typu. Při použití extrémně čistého izoprenu lze vyrobit polymer s více než 98 procentním obsahem adice cis-1,4 je však pochopitelně drahý.

Syntetický polyizopren lze kombinovat s přírodním kaučukem, polymer s obsahem adice cis-1,4 nad 98 % může přírodní kaučuk úplně nahradit.

V současné době převažuje jeho výroba v Rusku. Podíl ostatních výrobců je téměř zanedbatelný a stále klesá. I v Rusku roční objem výroby klesl z 2 milionů tun na čtvrtinu, a to proto, že ekonomicky nemohou izoprenové kaučuky soutěžit s přírodními a jejich strategický význam se zmenšuje. [15]

1.1.1.5 Silikonový kaučuk

Specifickou vlastností silikonových pryží je malá závislost jejich fyzikálních vlastností na teplotě ve velmi širokém teplotním rozmezí. Používají se běžně od -60°C do $+180^{\circ}\text{C}$. Velmi malá mezimolekulární soudržnost řetězců silikonového kaučuku, které toto chování podmiňuje, však na druhé straně vede k relativně horším fyzikálním vlastnostem těchto vulkanizátů (při běžných teplotách).

Základním silikonovým polymerem je plně nasycený polydimethylsiloxan (MQ). Používá se dnes převážně do licích, nátěrových a tmelových směsí. Jako elastomeru se jej již téměř nepoužívá, byl vytlačen „vynilmethylpolysiloxanem“ (VMQ), který je dnes nejběžnějším typem silikonového kaučuku. Je to vlastně polydimethylsiloxan obsahující kolem 0,2 mol % vinylových skupin, které substituují skupiny methylové. Typy VMQ mají lepší tepelnou stabilitu než typ MQ a umožňují výrobu silikonové pryže pro exploatační teploty až do 200°C . Speciální typy, „fenylnylmethylpolysiloxany“ (PVMQ) s makromolekulami polydimethylsiloxanu substituovanými navíc ještě fenylovými skupinami, jsou základem pryží určených k exploataci i při velmi nízkých teplotách (-90°C). „Trifluorpropylvinylmethylpolysiloxany“ (FVMQ) jsou používány k výrobě pryží odolávajících řadě rozpouštědel a raketovým palivům.

Kromě samotných polymerů vyrábějí se i směsi, zejména s plnivý. Běžnou specifikací je hustota produktu. [15]

1.2 Gumárenské směsi

Mezi hlavní gumárenské směsi patří vulkanizační činidla, urychlovače, aktivátory a retardéry, změkčovadla, antidegradanty a plniva. Tyto směsi usnadňují zpracování, umožňují vulkanizaci a dodávají pryži žádané vlastnosti.

1.2.1 Vulkanizační činidla

Pro gumárenské účely se používá buď tzv. rozpustná síra, krystalická (kosočtverečná) modifikace, jejíž molekuly jsou tvořeny osmičlennými kruhy S_8 nebo v menší míře polymerní forma, tzv. síra nerozpustná.

Síra se rozemílá na potřebnou jemnost (udává se ve stupních Chancelových, určených sedimentací) buď za mokra, nebo v atmosféře inertního plynu. Pro manipulaci se síra často olejuje nebo se k ní přidávají práškovité přísady, aby lépe „tekla“.

Elementární síra (nebo donor síry) reaguje s urychlovačem (je-li přítomen), aktivátory (oxid zinečnatý, mastná kyselina) a ostatními složkami kaučukové směsi za vzniku aktivního sulfuračního činidla, které reakcí s kaučukem dává vulkanizační meziprodukt.

Takto vytvořené příčné vazby jsou polysulfidické povahy a jejich podrobná struktura je závislá na typu vulkanizačního systému a podmínkách vulkanizace. [17]

Jako vulkanizační činidla lze použít také selen, tellur, organické peroxidy, nitrosloučeniny, diazosloučeniny, organické sloučeniny kovů a jiné látky. Z této skupiny mají větší význam jen organické peroxidy, které se používají pro vulkanizaci silikonových a polyuretanových kaučuků.

1.2.2 Urychlovače

Kdyby se kaučuková směs skládala pouze z eleastomeru a síry, musela by se zahřívat dlouhou dobu, aby se získala pryž. Pro zkrácení procesu se do směsi přidávají látky, které zkracují vulkanizační dobu a nazývají se urychlovače. Zásadou urychlovačů je, aby nezpůsobily navulkanizování směsi v průběhu zpracovatelských operací, zlepšily mechanické vlastnosti pryže, byly nejedovaté a cenově přístupné.

V této době se výhradně používá organických urychlovačů. Dělí se obvykle podle toho, jak rychle ovlivní potřebnou dobu vulkanizace a lze je třídit do těchto skupin: pomalu působící, se zpožděným účinkem, středně rychlé, rychle působící, ultraurychlovače.

Urychlovačů je přes 100 druhů, přičemž i stejné chemikálie jsou dodávány pod různými obchodními názvy. [7]

1.2.3 Aktivátory a retardéry

Je to skupina anorganických nebo organických, které ve směsi aktivují nebo přechodně potlačují účinek vulkanizačního činidla. Bez aktivátorů neprojevují urychlovače plně svou účinnost, a to ani v průběhu vulkanizace, ani v přímém vlivu na fyzikální vlastnosti.

Nejběžnějším aktivátorem je kysličník zinečnatý (zinková běloba), který se přidává prakticky do všech kaučukových směsí pro získání měkké pryže. Dalšími aktivátory jsou stearan zinečnatý, oxid vápenatý, oxid hořečnatý, oxid olovnatý apod.

Retardéry chrání směs před předčasným navulkanizováním při míchání a delším zpracování, jsou to přísady, které nemají mít vliv na konečný stav vulkanizace, ale ovlivňují její průběh takovým způsobem, aby byla zajištěna bezpečnost zpracování při přípravných operacích, popřípadě aby k zahájení vulkanizace došlo u některých částí komplikovanějších výrobků později. Nejznámější retardéry jsou kyseliny ftalová a benzoová, salicylová, ftalanhydrid a nitrosodifenylamin. [7]

1.2.4 Změkčovadla

Změkčovadla jsou málo těkavé organické látky kapalné nebo tuhé, které poskytují organickým polymerům ohebnost, tvárnost a zvětšují jejich termoplastičnost tím, že snižují viskozitu taveniny, teplotu zesklenní a elastický modul produktu. V principu mohou jako změkčovadla působit všechny organické kapaliny.

Principem působení změkčovadel v plastických hmotách je zvýšení vnitřní pohyblivosti (mikro-Brownova pohybu) makromolekul; malá pohyblivost makromolekul je totiž příčinou tuhosti materiálu a nízké teploty zesklenní.

Důležitým kritériem praktického použití změkčovadla je jeho snášlivost s polymerem. Rozpouští-li se polymer zcela ve změkčovadle, popř. je-li polymer zcela rozpustný v rozsahu významných koncentrací, mluvíme o tzv. snášlivých změkčovadlech. Je-li však jeho rozpustnost ve změkčovadle omezena, a to především v technicky důležitém rozsahu koncentrací, to znamená, že existují dvě fáze – fáze málo změkčeného polymeru a fáze bohatá na změkčovadlo, taková změkčovadla nazýváme nesnášlivá.

Změkčovadla se uplatňují hlavně při přípravě kaučukových směsí, kde umožňují připravovat směsi s vysokým obsahem plniv, ale i zlepšovat speciální vlastnosti pryže např. přílnavost běhounu pneumatiky k vozovce. [13]

1.2.5 Antidegradanty

Antidegradanty dlouhodobě chrání výrobky před vnějšími vlivy (sluneční záření, atmosférický kyslík, ozón, tepelná energie, aj.) během jejich používání.

Světelné stabilizátory jsou přísady, které absorbují UV záření, část světelného spektra, jejíž energie je dostatečně velká k tomu, aby způsobovala degradaci polymeru. Záření o vlnových délkách 300 – 400 nm nesmějí propouštět, ale musejí ho absorbovat. Absorbované UV záření musí přeměnit na záření energeticky chudší, neškodné pro polymery (např. dlouhovlnné tepelné záření, jehož energie nepostačí k degradaci polymeru), ale samotné stabilizátory musí být vůči UV záření odolné a přijatou energii musí přeměnit bez jakékoliv změny. Nesmí docházet k žádné chemické reakci mezi antidegradanty, polymery a ostatními přísadami (mohlo by dojít ke změně barvy výrobku).

Antioxidanty jsou přísady, které chrání polymery před kyslíkem, způsobující degradaci polymerů. Degradace se běžně projeví až cca po 10 letech. Degradaci nejvíce podléhají nenasycené polymery, v jejichž makromolekulárních řetězcích vznikají hydroperoxidové skupiny -O-O-H. Ty se pak snadno štěpí na radikály, které zahajují řetězovou oxidační reakci vedoucí k degradaci polymeru. Ochrana spočívá v zabránění řetězového průběhu oxidace, která má v nechráněném polymeru autokatalytický průběh (je urychlována vlastními reakčními produkty). Naváže-li se na pryž z přírodního kaučuku 1 % O² klesne její pevnost v tahu na polovinu původní hodnoty.

Ozon napadá jen pryž, vyrobenou z nenasycených kaučuků. Ze všech degradačních faktorů má na pryž největší účinek. I když jsou ve vzduchu velmi malé koncentrace ozonu, reaguje velmi snadno s dvojnými vazbami makromolekulárního řetězce kaučukové sítě. Slučuje se na pryži ve formě velmi křehkého ozonidu, který pokrývá povrch vysoce elastické pryže. Praskající vrstva ozonidu odhaluje nový povrch pryže, který ozon znovu napadá. Antiozonanty reagují s ozonem mnohem ochotněji než řetězce kaučukové sítě a navíc dále difundují k povrchu, kde pryž chrání. [8]

1.2.6 Plniva a ztužovadla

Ztužovadla jsou látky, které zvyšují houževnatost, odolnost směsi proti opotřebení, její pevnost a odpor proti natržení a přitom nezhoršují její tažnost a elasticitu. Přísady mají větší ztužující účinek, čím jsou jejich částice jemnější. Nejdůležitějšími ztužovadly jsou saze a rozdělují se na: kanálové, retortové a termické saze. [8]

Plniva jsou přísady, kterými se upravují vlastnosti základního materiálu nebo se snižuje cena výrobku. V mnoha případech zvyšují pevnost (plniva vláknitého charakteru), zlepšují elektrické vlastnosti, odolnost proti odírání, teplovzdornost, odolnost proti vznícení, chemickou odolnost aj. Mezi plniva lze řadit například křídou, kaolín a těživec. [13]

Saze jsou masově používány jako plnivo do elastomerů, plastů, ale také do barev, laků a tiskařských materiálů, díky své vlastnosti modifikovat mechanické, elektrické a optické vlastnosti materiálů, ve kterých jsou dispergovány a tím následně určovat jejich aplikační možnosti v daném tržním segmentu. Při použití v pryžových materiálech se využívá jejich ztužujících vlastností – zlepšení pevnosti, strukturální pevnosti, odolnosti vůči oděru a tím celkově životnosti pryžových výrobků. [14]

1.2.7 Ostatní přísady

Do kaučukových směsí se přidává řada dalších přísad, z nichž nejdůležitější jsou:

- Pigmenty – barvení plastických hmot je nezbytnou součástí jejich zpracovatelské technologie. Používají se barviva jako titanová běloba, litopon, červeň H, kadmínová žluť, citrónová žluť, okry, ultramarín, aj. [13]

- Faktivy – přídavek zlepšující jakost povrchu a rozměrovou stabilitu (faktis bílý, faktiv hnědý)
- Nadouvadla – jsou látky, které se při určité teplotě snadno rozkládají za mocného vývoje plynu. Jsou přísadami pro přípravu lehčených plastických hmot a kaučuků. Používá se hydrogenuhličitan sodný a uhličitan amonný. [13]
- Separační činidla - pro mnohé zpracovatelské technologie, jako např. lisování, vytlačování, tepelné svařování atd., je dosti závažným problémem lepení plastického materiálu na tvarovací nebo tvářecí součásti zpracovatelských zařízení. Nejznámějšími činidly jsou klouzek, velmi jemně mletý vápenec, ebonitový prach, škrob, slída a silikonové oleje. Nevýhodou je, že tiskové barvy nebo kovové vrstvy na polymeru špatně drží. [13]
- Rozpouštědla - používají se k přípravě lepidel, k oživení povrchu neztvulkanizovaných směsí při konfekci, pro výrobu máčené pryže, pryžových nití apod. Patří mezi ně především benzín, benzen, toluen, xylen, aceton, aj.
- Regenerát - vyráběný z vytríděných pryžových odpadů. Odpady se nejdříve rozřežou a rozdrtí, odstraní se z nich kovové a jiné předměty a pak se podrobí vlastní regeneraci, která spočívá v tepelném, chemickém a mechanickém zpracování.
- Plastikační činidla - usnadňují plastikaci tj. úpravu kaučuku intenzivním hnětením, zvyšují účinnost a rychlost hnětení, protože usnadňují štěpení makromolekul kaučuku a stabilizují přechodně vzniklé radikály. Používají se také při zpracování odpadní pryže na regenerát.
- Maziva – jejich účelem je usnadnit zpracování těžko zpracovatelných polymerů, přičemž nemají pokud možno ovlivňovat ostatní vlastnosti výrobků, jako např. průhlednost, tepelnou stabilitu, mechanické vlastnosti atp. Často svými ostatními vlastnostmi výrobek ještě zkvalitňují. Jako maziv se používá kyseliny stearové a jejich solí s Ca, Ba, Pb, Cd, Al atd. (z nichž některé současně působí jako světelné a tepelné stabilizátory), z přírodních vosků, mikrokrystalických parafinů, minerálních a rostlinných olejů, velrybího tuku aj. [13]
- Tepelné stabilizátory - tepelné stabilizátory jsou látky, které umožňují tvarování za tepla a tváření polymerů, jejichž teploty měknutí a rozkladu leží v úzkém rozmezí. Tepelné stabilizátory musí zamezit odštěpování chlorovodíku a zabraňovat tím korozi, zabraňovat

vzniku barevných struktur a být snášenlivý s polymerem. Patří k nim především homopolymery a kopolymery vinylchloridu. [7]

1.3 Mechanické vlastnosti elastomerů

1.3.1 Obecná teorie elastických deformací

Obecné řešení vztahu mezi tahem a tlakem u pryžových materiálů bylo vyvinuto Rivlinem a vyplývá ze vztahu pro měrnou deformační energii (W), který může být přímo funkcí deformačních invariantů nebo hlavních protažení:

$$\begin{aligned} W &= W(I_1, I_2, I_3) \\ W &= W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \end{aligned} \quad (1)$$

kde I_i jsou invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, λ_i jsou hlavní protažení.

Na měrné deformační energii je založen vztah pro napětí ve směru ij , který je definovaný jako:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (2)$$

kde E_{ij} je Lagrangeův deformační tenzor. Předpokládáme, že materiál je izotropní v elastickém chování v nezátíženém stavu a téměř nestlačitelný v objemu. Postup při měření napětí na vzorku elastomeru, nezávislý na výběru osy, je dán třemi deformačními invarianty, definovanými jako:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 - 3 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

kde symboly $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ značí hlavní protažení, definované jako procento z protažené délky na neprotáženou délku hran malého objemového elementu, krychlového v nezátíženém stavu:

$$\lambda = \frac{l}{l_0} = \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Hodnoty λ_i jsou dány $(1 + \varepsilon_i)$, kde ε_i je poměrná deformace, hodnoty I_i jsou nulové v nezátíženém stavu, když $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$. Pro nestlačitelné materiály je I_3 nulové, tudíž zůstávají pouze dvě nezávislé hodnoty napěťových konstant I_1, I_2 , odkud vyplývá rovnice deformační energie [9]:

$$W = W(I_1, I_2) \quad (5)$$

1.3.2 Obecný vztah mezi napětím a deformací

Vztah mezi napětím a deformací získáme z funkce měrné deformační energie, vyjádřením „virtuální“ práce, uvažované jako:

$$\delta W = (\sigma_1 / \lambda_1) \cdot (\partial W / \partial \lambda_1) \delta \lambda_1 \quad (6)$$

analogicky lze vyjádřit vztah pro λ_2, λ_3 . Pro σ_1 obdržíme:

$$\sigma_1 = 2 \left[\lambda_1^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] + P \quad (7)$$

s analogickými vztahy pro σ_2 a σ_3 , kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ jsou jednotlivá skutečná napětí. Množství P udává nespecifikovaný tlak. P se stanovuje na základě známých hodnot σ a λ při základních módech zatěžování. [9,10]

1.3.3 Jednoosá napjatost

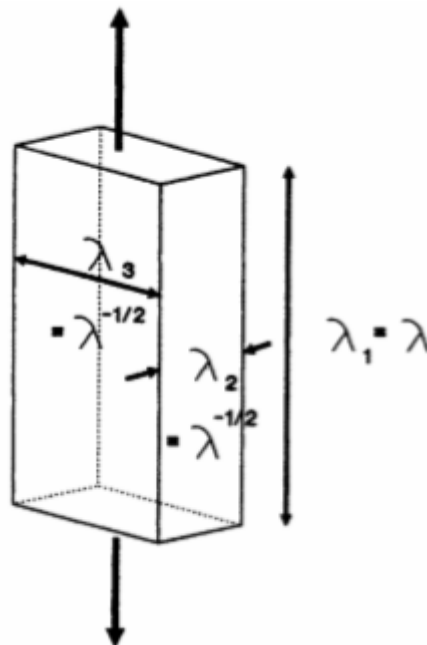
Jednoosý tah lze testovat na univerzálních zkušebních strojích. V tomto případě je vzorek materiálu roztahován ve směru jediné osy. Jednoduché prodloužení je definováno poměrným protažením $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$. Tato deformace vyplývá ze stavu nestlačitelnosti, kdy objem zůstává nezměněn a tudíž $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$. Pro tento stav napětí, kde jsou boční strany daného vzorku nezátížené, platí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a rovnice pro σ_2 a σ_3 se stane rovnicí neznámého stlačení P :

$$P = -2 \left[\lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (8)$$

Když tuto rovnici dosadíme do vztahu pro $\sigma_1 (= \sigma)$ výsledek je:

$$\sigma = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \quad (9)$$

,kde σ udává skutečné napětí.



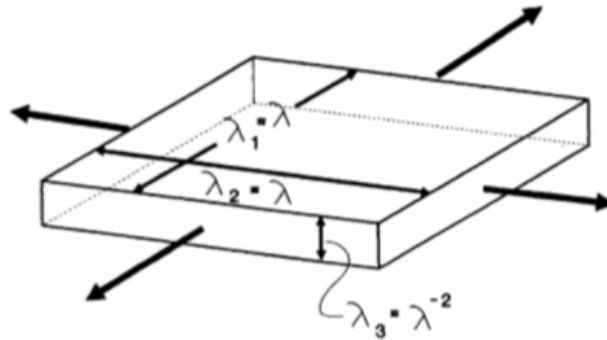
Obr. 7 Jednoosá napjatost

Předchozí rovnice je „velko-deformační“ ekvivalent jednoduchého vztahu Hookova zákona, $\sigma = E \cdot \varepsilon$ aplikovatelného při malých deformacích. [9]

1.3.4 Dvousá napjatost

Při dvouosém zatížení je nutno plochý vzorek materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny (dochází k tomu např. při nafukování míče). Tohoto stavu lze dosáhnout několika způsoby: vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem, roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů nebo roztahováním kruhového vzorku radiálně ve směru od středu. Vztah pro dvouosou napjatost můžeme získat ze

vztahů pro jednoosou napjatost. Poměrné protažení je dáno jako $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$; $\lambda_3 = 1/\lambda^2$. Napětí σ_3 je nulové, protože tato strana vzorku je nezátížená. Tudiž tlak P v rovnici přechází na $P = -2(\lambda^{-4}W_1 - \lambda^4W_2)$. Napětí σ_2 a σ_1 jsou dány jako: $\sigma_1 = \sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2)(\lambda^2 - \lambda^{-4})$. Což opět potvrzuje, že mezi napětím a deformací existuje vysoce nelineární vztah. [9]



Obr. 8 Dvouosá napjatost

1.3.5 Čistý smyk

Následující deformační stav je popsán jako „čistý smyk“. Ten je definován jako napětí použité ve směru 1, v takové formě, že je zamezeno změně šířky ve směru 2, tzn. $\lambda_2 = 1$. Toto je odůvodnění pro název „smyk“. Při smykové deformaci linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení. „Čistý“ znamená, že hlavní osy nerotují během deformace. Čistého smyku lze v tělese dosáhnout natahováním podélného vzorku, jehož výška je alespoň 10x menší než jeho šířka. Dlouhé horizontální svorky zabraňují kontrakci vedlejších stran vzorku a dochází pouze k napětí ve vertikálním směru, takže je dáno $\lambda_2 = 1$.

Poměrné prodloužení je při deformaci dáno jako: $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 1$ a $\lambda_3 = 1/\lambda$, zatímco napětí $\sigma_3 = 0$. Napětí σ_2 je vyvoláno tuhými svorkami, takže není nulové. Z rovnice tlak P obdržíme jako:

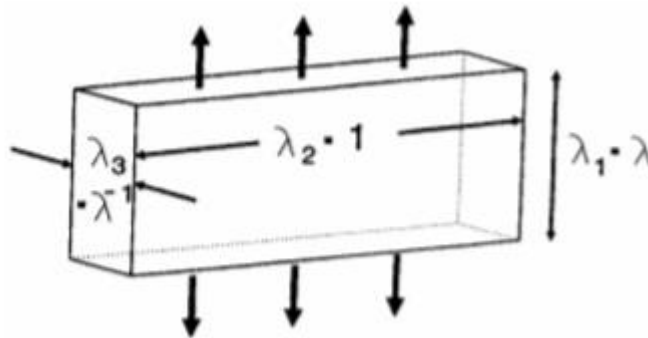
$$P = -2(\lambda^{-2}W_1 - \lambda^2W_2) \quad (10)$$

Tudiž napětí $\sigma_1 (= \sigma)$ v protahovaném směru je dáno jako:

$$\sigma = 2(W_1 + W_2) \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (11)$$

a vedlejší napětí σ_2 je:

$$\sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2) \cdot (1 - \lambda^{-2}) \quad (12)$$

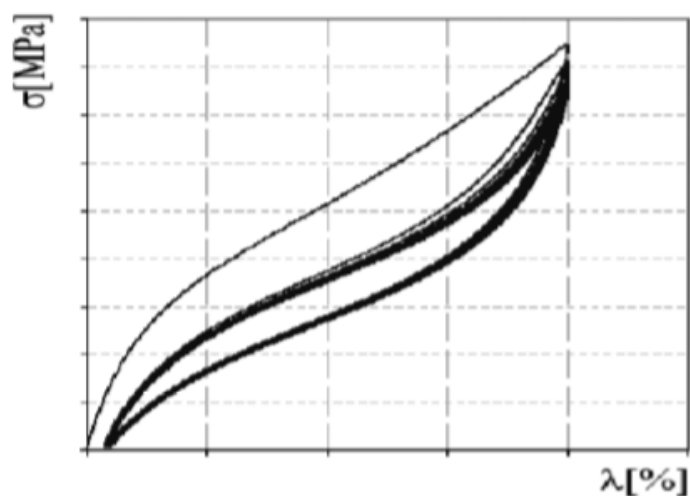


Obr. 9 Čistý smyk

Vztah mezi tahem a tlakem při nuceném napětí je opět nelineární funkcí. [9]

1.3.6 Průběh mechanického zatěžování

Při cyklickém zatížení se křivka závislosti mezi napětím a deformací mění podle počtu cyklů. Při prvním zatížení působí na materiál vyšší napětí při stejné poměrné deformaci než v dalších cyklech. Projevuje se zde efekt měknutí zatěžovaného materiálu označovaný jako Mullinův efekt. Dále v průběhu každého jednotlivého zatěžování má křivka jiný průběh než při zpětném povolování, kdy se deformovaný materiál vrací zpět do původního tvaru při menším napětí za stejné poměrné deformace.



Obr. 10 Křivka vztahu napětí a deformace

Pro přesné určení materiálových konstant pro jednotlivé modely je třeba z diagramu určit typickou křivku průběhu. Materiálové konstanty se potom určují metodou nejmenších čtverců. Pro přesnou aproximaci je potřeba analyzovat ze třech pracovních diagramů, pro jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Při použití pouze jednoho diagramu nebudou hodnoty dostatečně přesné.

1.3.7 Zkoušení hyperelastických materiálů

Při zkoušení hyperelastických materiálů se obvykle používají metody zatěžování pro jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Výsledky těchto zkoušek potom lze použít pro přesnou aproximaci charakteristiky chování daného materiálu při zatěžování. Podstatou zkoušky pro jednoosou napjatost je protahování standardního zkušební tělesa na trhacím stroji konstantní rychlostí v jednom směru, přičemž se odečítají hodnoty síly a prodloužení, potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik protahovaných zkušebních těles. Protahování probíhá až do okamžiku přetržení tělesa. Při zkoušce pro dvouosou napjatost je zkušební těleso protahováno v trhacím stroji rovnoměrnou zatěžovací silou ve dvou směrech, přičemž se odečítají hodnoty síly a protažení. Zkušební těleso tvaru čtverce je v trhacím stroji rovnoměrně upnuto po celém svém obvodu. Při zkoušce pro čistý smyk je zkušební těleso obdélníkového tvaru rovnoměrně zatěžováno v hlavním směru tak, aby bylo zabráněno změně šířky vedlejších stran, pomocí dlouhých horizontálních svorek. V průběhu zatěžování linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení. [11]

1.3.8 Přehled materiálových modelů

Intenzivní vývoj nelineárních hyperelastických materiálových modelů probíhá od 2. pol. 20. století. Tyto modely jsou založeny na definici vztahu pro měrnou deformační energii W . V průběhu posledních 60 let bylo různými autory postupně navrženo velké množství hyperelastických modelů. Tyto modely jsou nezávislé na rychlosti a historii deformace. V posledních letech jsou však publikovány práce zabývající se modelováním zahrnujícím i tyto efekty. [12]

1.3.9 Kategorie modelů

Část hyperelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů (např. Neo-Hookean, Arruda-Boyce)- Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam. Další skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby model co nejlépe aproximoval tato pozorování. Takové modely (např. Polynomický, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Gent) jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní význam. [12]

Polynomická forma

Polynomická forma je založena na první a druhé deformační invariantě (I_1, I_2). Jde o model, jenž má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (13)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Tato forma může být aplikována pro deformaci dosahující až 300 %. [10,12]

Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech dvacátého století Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založený na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie.

Používají se dvou, tří, pěti a devíti-parametrové Mooney Rivlin modely, které také můžeme uvažovat jako jednotlivé případy polynomické formy.

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

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

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

- Tří-parametrový model je shodný s polynomicou formou když $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$:

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

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

- Pěti-parametrový model je stejný jako polynomicá forma, když $N = 2$:

$$W = \sum_{i+j=1}^2 c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (16)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty.

- Devíti-parametrový model je stejný jako polynomicá forma, když $N = 3$:

$$W = \sum_{i+j=1}^3 c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (17)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty.

Dvou-parametrový model může být validní pro 90-100 % tahové deformace, ale nemusí být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení. Pěti nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro deformace až 300 %. [10,12]

Yeoh

Model Yeoh je jednoduchý a podobný jako polynomicá forma, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Je definován jako:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (18)$$

kde c_{i0} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Yeoh model je obvykle uvažován s $N = 3$. Tří-parametrový Yeoh model obecně poskytuje dobré výsledky pro širokou škálu tahové deformace i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty. [10,12]

Neo-Hookean

Model Neo-Hookean k nejstarším a poměrně jednoduchým modelům a je možné ho brát, jako podmnožinu polynomická formy pro $N = 1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$:

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) \quad (19)$$

kde μ je počáteční smykový modul.

Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomeru. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napět'ově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci. Model je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání. [10,12]

Arruda-Boyce

Arruda-Boyce je model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Arruda-Boyce může být uvažovaná jako rozšíření modelu Yeoh pro $N = 5$, kde konstanty mají reálný význam

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

kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7050}, C_5 = \frac{519}{673750} \quad (21)$$

Z předcházející rovnice je jasné, že Arruda-Boyce forma může být myšlena jako model s $N = 5$, kde μ je počáteční smykový modul.

Limitní síťové protažení λ_L je protažení, při kterém se napětí začíná blížit nekonečnu. Jestliže se λ_L rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. Model je limitován pro maximální deformaci do 300%. [10,12]

Gent

Gent model je mikromechanický model, podobný jako Arruda-Boyce, jenž užívá konceptu limitního síťového protažení:

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right) \quad (22)$$

konstanta E je počáteční modul pružnosti, který se pro nestlačitelné materiály rovná $3\mu_0 \cdot I_m$ je limitní hodnota $(I_1 - 3)$, analogická k λ_L u Arruda-Boyce modelu. Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu Yeoh. Gent model může být uvažován jako rozšíření modelu Yeoh, kde konstanty mají reálný význam. Je velmi dobrý pro malé a velké protažení. [10,12]

Ogden

V roce 1972 Ogden navrhl napět'ovou energetickou funkci vyjádřenou v hodnotách hlavního protažení, které je poměrně často používaný pro popis hyperelastických materiálů:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (23)$$

kde μ_i , α_i jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Pro $N = 1$ a $\alpha_1 = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro $N = 2$, $\alpha_1 = 2$ a $\alpha_2 = -2$ Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden může být obecně aplikován pro deformaci do 700%. [10,12]

II PRAKTICKÁ ČÁST

2 CÍL PRÁCE

Cílem mé práce bylo určit vlastnosti elastomerů při zatížení v čistém smyku a dvouosé napjatosti, určení charakteristiky průběhu závislosti napětí na poměrné deformaci pro jednotlivé vzorky. Pro měření čistého smyku bylo použito trhačího stroje Shimadzu AGS-50kNXD, pro měření dvouosé napjatosti bylo použito zkušebního zařízení pro nafukování vzorků.

2.1 Zkušební materiál

Informace o použitých směsích v materiálech (dsk sazí – počet dílků sazí na 100 kusů kaučuku):

Směs	Saze [dsk]	Kaučuk
C	64	NR,BR,SBR
D	60	NR
E	56	NR
F	26	NR
G	54	NR, BR
H	50	NR,BR,SBR
I	50	NR,BR,SBR

Tab. I Informace o směsích

2.2 Metodika měření

2.2.1 Čistý smyk

2.2.1.1 Postup měření

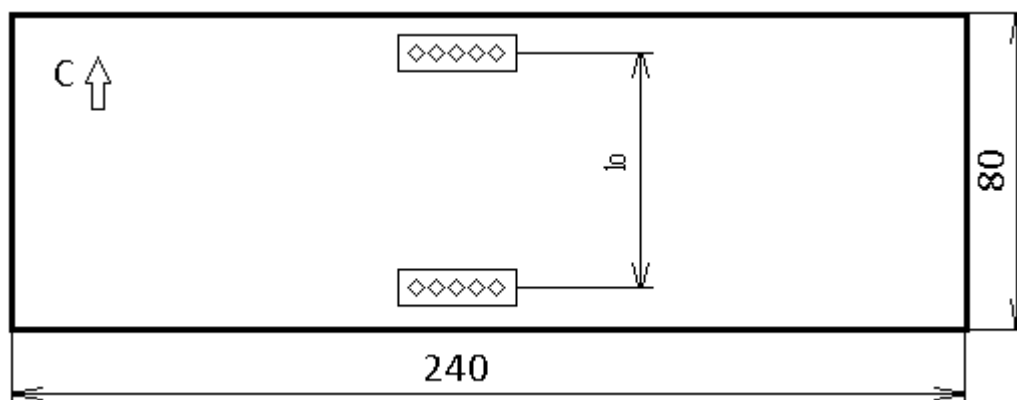
1.) Nastříhání vzorků elastomerů na velikost pro měření na trhačím stroji Shimadzu AGS-50kNXD. Vzorky měly velikost 240mm x 80mm a každý ze vzorků byl označen směrem jakým byl válcován.

2.) Nastavení metody testu v počítači - v softwaru TRAPEZIUM, nastavení parametrů vzorku.

- 3.) Upnutí vzorku do čelistí.
- 4.) Nastavení oblasti snímání digitálním fotoaparátem na počítači.
- 5.) Přilepení identifikačních symbolů na vzorek, aby snímací kamera opticky zaznamenala průběh zkoušky
- 6.) Spuštění testu, vzorek byl natahován rychlostí 20 mm/min až do vytrhnutí z čelistí, počítač v průběhu testu vykresloval graf závislosti napětí v tahu na poměrném prodloužení.
- 7.) Po vytrhnutí vzorku z čelistí, byl počítačem stroj vypnut a stejný postup aplikován u zbylých vzorků.

2.2.1.2 Zkušební vzorky

Pro testování byly použity materiály pro výrobu pneumatik. Tyto materiály byly vyrobeny válcováním o tloušťce 2mm a byly označeny písmeny C až I a směry podle kterých byly válcovány. Pro čistý smyk byly rozstříhány vzorky na velikost 240mm x 80mm, od každého materiálu 6 (pro testování ve směru válcování stejném jako směru natahování vzorků 3 a pro testování ve směru válcováním kolmém na směr natahování vzorků 3). Zkouška probíhala při laboratorní teplotě.



Obr. 11 Zkušební vzorek pro čistý smyk

2.2.1.3 Zkušební zařízení

Trhací stroj Shimadzu AGS-50kNXD:

Rozsah zdvihu příčnicku je 0 až 1250 mm

Rozsah zkušební rychlosti příčnicku 0,001 až 1600 mm/min

Rozsah zpětné rychlosti příčnicku je až 2200 mm/min

Šířka pracovního prostoru je 425 mm

Použití snímačů sil od 1 N do 50 kN

max. $\pm 1\%$ indikované hodnoty - zaručená přesnost měření je v rozmezí (od 1/+ do 1/500 nominální zátěže snímače síly)

Odpovídá EN 10002-2 stupeň 1, ISO 7500-1 třídy 1, BS 1610 třídy 1, a ASTM E4, JIS B7721 Třída 1.

Dále bylo použito softwaru TRAPEZIUM pro vyhodnocení testů na počítači, posuvného měřítka pro měření tloušťky a identifikačních symbolů pro optické zařízení stroje.

2.2.1.4 Zpracování naměřených dat

Data byla zpracována celkově pro 42 vzorků ze sedmi materiálů. Průběh každé zkoušky byl zaznamenáván optickou kamerou a vyhodnocován softwarem pro trhací stroj. Data z počítače byly převedeny do tabulkového editoru Excel a byly vytvořeny grafy znázorňující závislost napětí na poměrném prodloužení. Počítač zaznamenával hodnoty každých 0,05s pro každý z 42 vzorků.

Hodnoty napětí byly vypočteny podle vzorců:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (24)$$

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

kde F je zatěžovací síla, S je plocha průřezu pracovní části, l je délka pracovní části tělesa při protažení a l_0 je délka pracovní části tělesa před deformací.

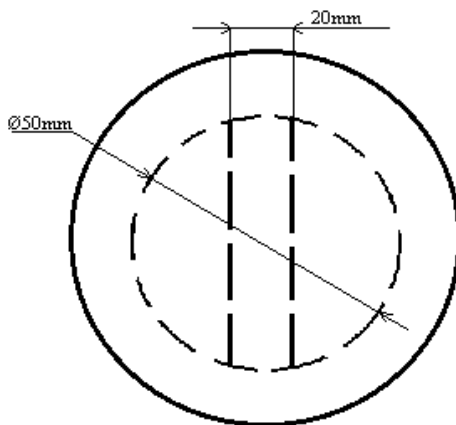
2.2.2 Dvouosá napjatost

2.2.2.1 Postup měření

- 1.) Nastříhání vzorků elastomerů na velikost pro měření na zkušebním zařízení.
- 2.) Upnutí vzorků do zkušebního zařízení.
- 3.) Natočení a zaostření snímací kamery podélně s vyznačenými rovnoběžkami, jejichž vzdálenost byla měřena.
- 4.) Přidávání tlaku, vzorek byl roztahován až do hodnot, kdy vzdálenost dvou rovnoběžek byla větší než 1,3cm (pro vyhodnocení Modulu 30 %).
- 5.) Vypuštění vzduchu do atmosféry.
- 6.) Rozstříhání videa do obrázků a následné měření vzdálenosti rovnoběžek v programu AutoCad pro 20 obrázků v celém intervalu roztahování vzorku.
- 7.) Vyhodnocení výsledků v tabulkovém editoru.

2.2.2.2 Zkušební vzorky

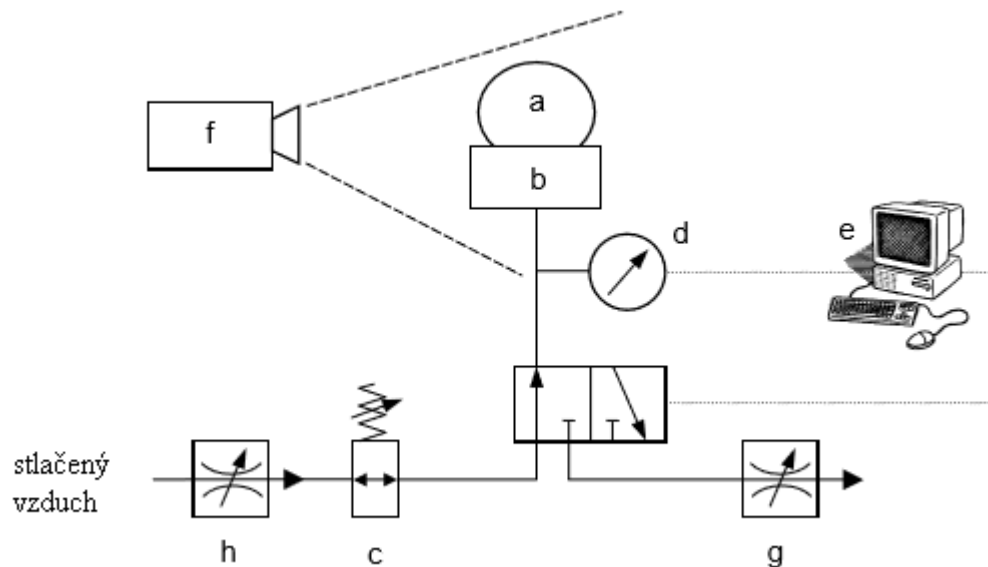
Byly použity stejné materiály jako pro zkoušku čistého smyku, označeny písmeny C až I. Pro zkoušku z dvouosé napjatosti byly rozstříhány vzorky kruhového tvaru, kde průměr nafukované části byl 50mm. Počet vzorků od každého materiálu byl 3. Zkouška probíhala při laboratorní teplotě.



Obr. 12 Zkušební vzorek pro dvouosou napjatost

2.2.2.3 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení pro měření dvouosé napjatosti je tvořeno zařízením pro úpravu stlačeného vzduchu, vstupním ventilem (h), regulátorem tlaku (c), přírubou pro uchycení vzorku (b), tlakoměrem pro přesné určení dosaženého zatížení (d), digitálním fotoaparátem (f) a výstupním ventilem (g). (obr. 23)



Obr. 13 Schéma zkušebního zařízení pro dvouosou napjatost

2.2.2.4 Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla snímána digitálním fotoaparátem. Bylo vybráno 20 snímků, které rovnoměrně pokrývaly celý průběh testu. Z těchto byla poté zjišťována velikost prodloužení měřeného úseku (oblouku) a poloměr tohoto oblouku. Za pomoci příslušného softwaru byla graficky vyhodnocena závislost napětí na protažení pro každý materiál.

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{2t} [\text{Mpa}] \quad (26)$$

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

kde p je tlak uvnitř vzorku, r je poloměr pracovní části, t je tloušťka zkušebního vzorku, l je délka pracovní části tělesa při protažení a l_0 je délka pracovní části tělesa před deformací (20mm).

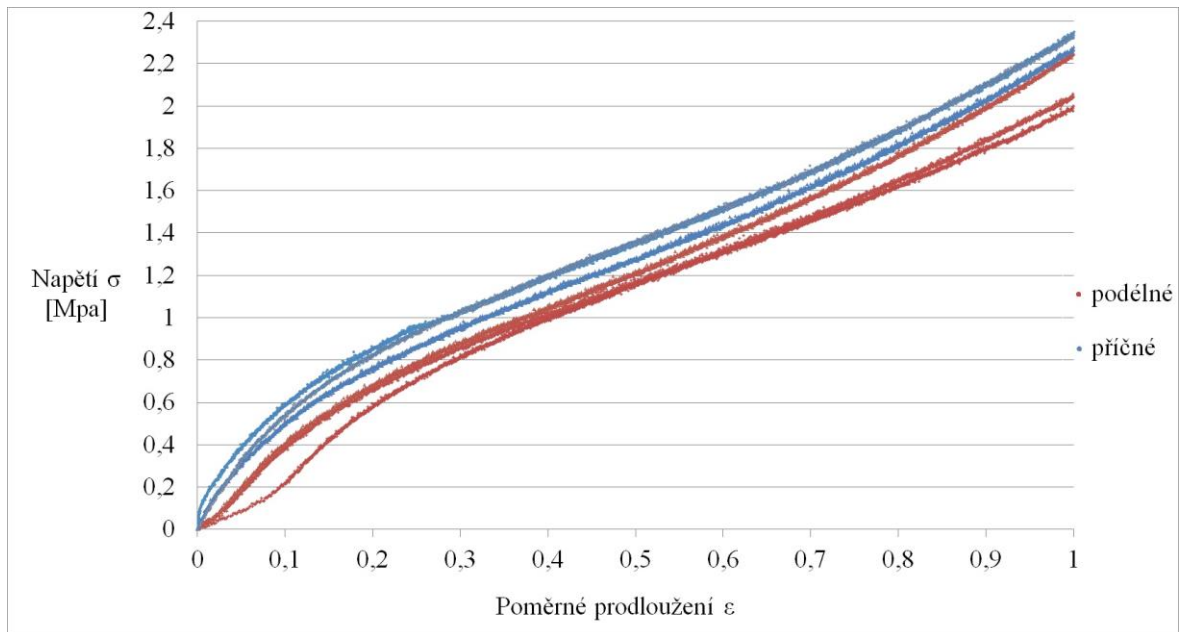
3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Průběhy experimentální závislosti napětí na poměrném prodloužení pro čistý smyk a pro dvouosou napjatost jsou uvedeny na obr. 14 až 27. Při závislosti čistého smyku byly srovnávány především směry, kterými byly materiály válcovány. Hodnoty modulů 30%, 50%, 60% pro jednotlivé materiály jsou uvedené v Tab. II - IV a Obr. 28 - 30.

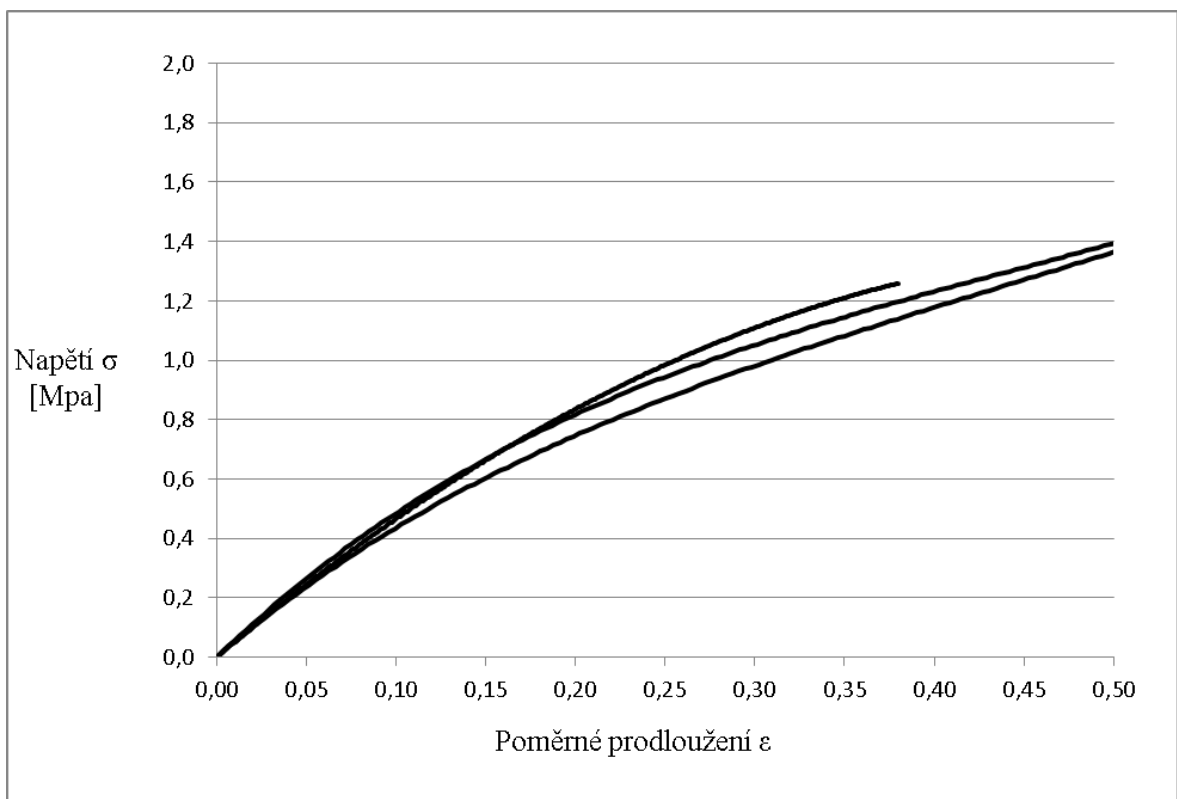
Materiály se při zkoušce z dvouosé napjatosti nerozlišovaly podle směru válcování. Od každého druhu materiálu byl počet zkoušených vzorků tři.

Označení Modul 30 % není modul pružnosti, ale jedná se o napětí při poměrném prodloužení vzorku 0,3, Modul 50 % vyjadřuje napětí při poměrném prodloužení 0,5 atp.

3.1 Materiál C

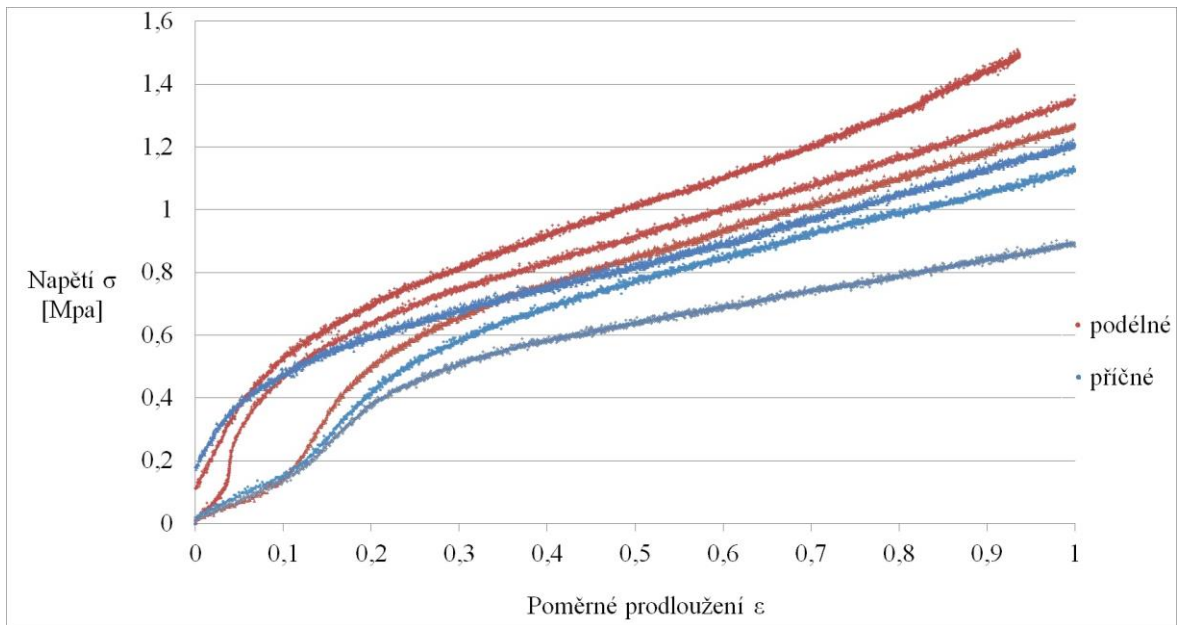


Obr. 14 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál C

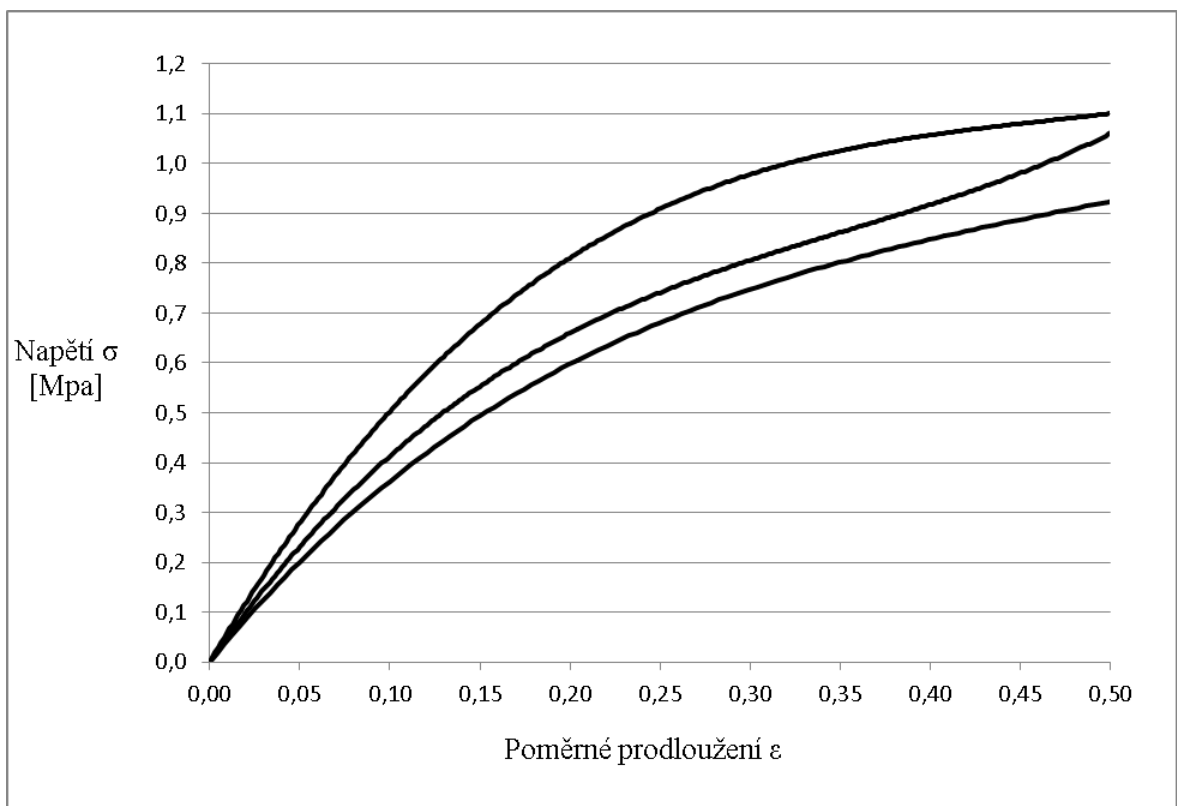


Obr. 15 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvousé napjatosti pro materiál C

3.2 Materiál D

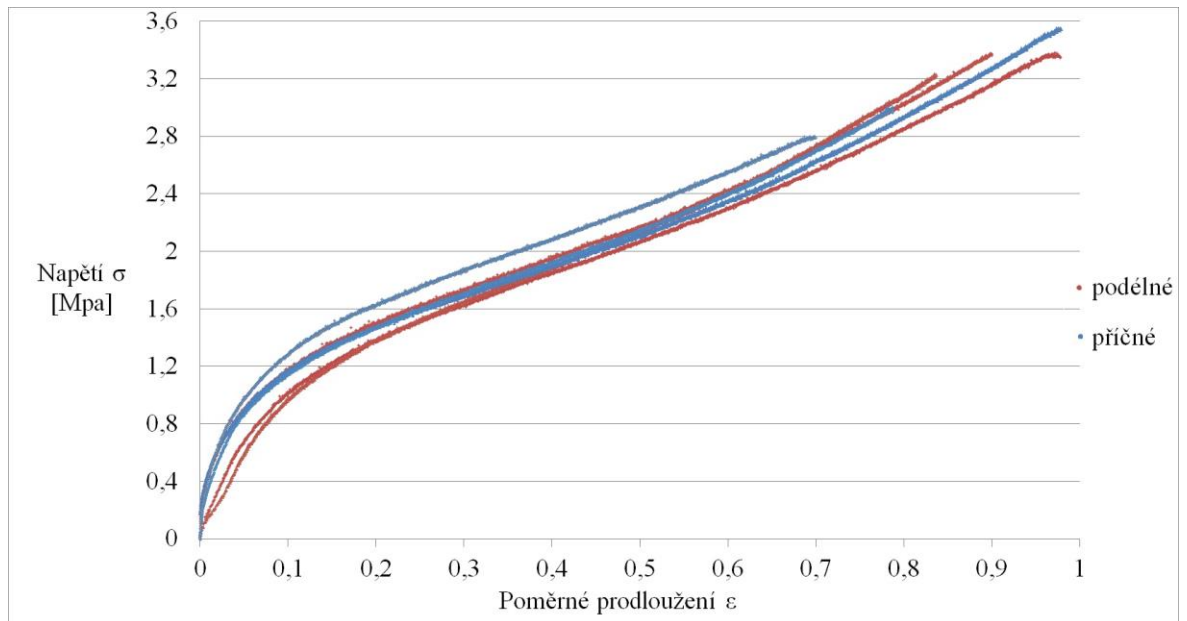


Obr. 16 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál D

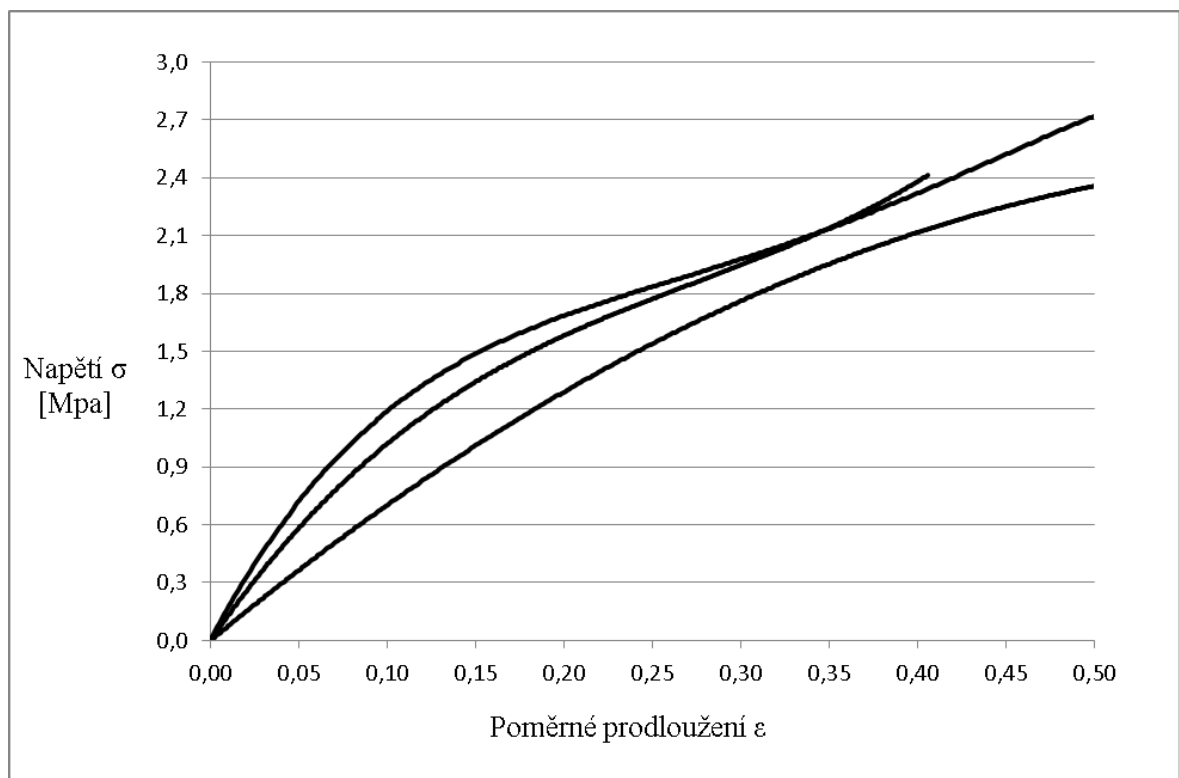


Obr. 17 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvuosé napjatosti pro materiál D

3.3 Materiál E

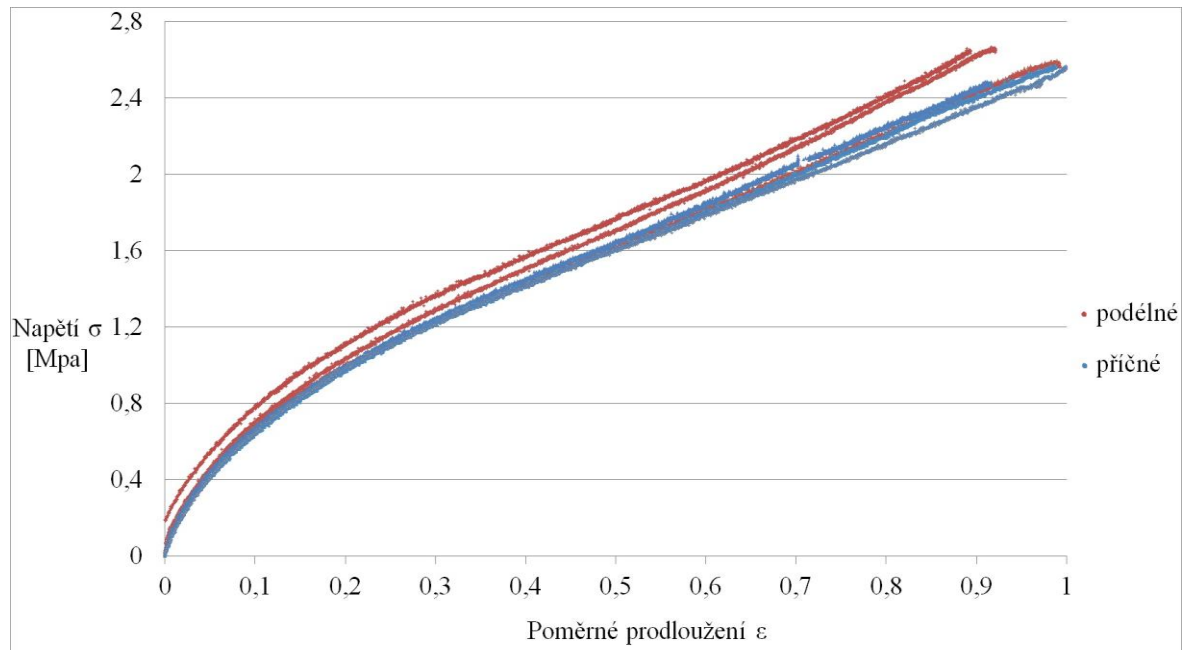


Obr. 18 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál E

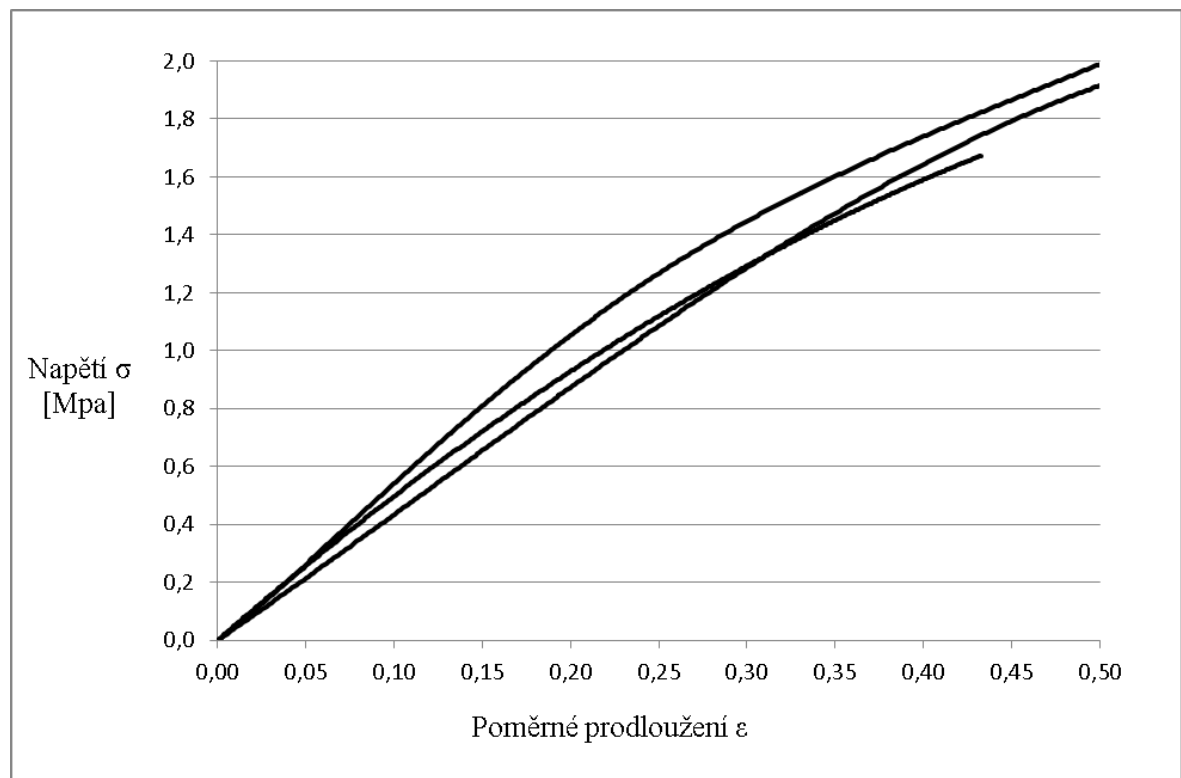


Obr. 19 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvousé napjatosti pro materiál E

3.4 Materiál F

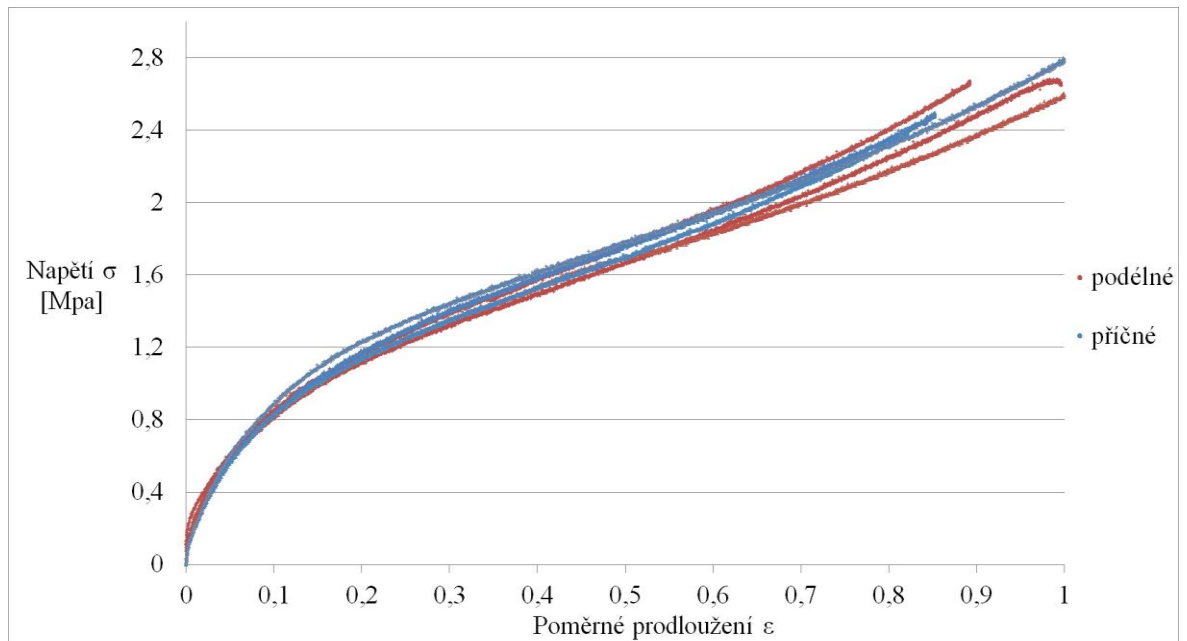


Obr. 20 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál F

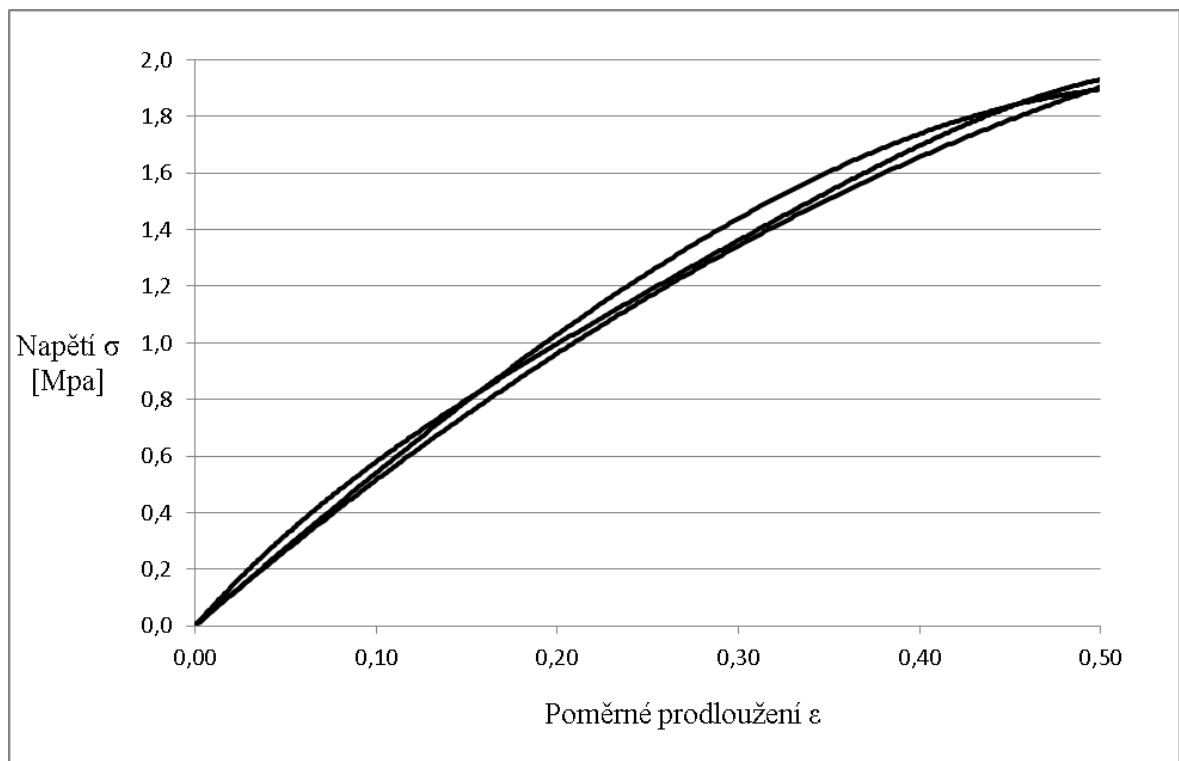


Obr. 21 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvousé napjatosti pro materiál F

3.5 Materiál G

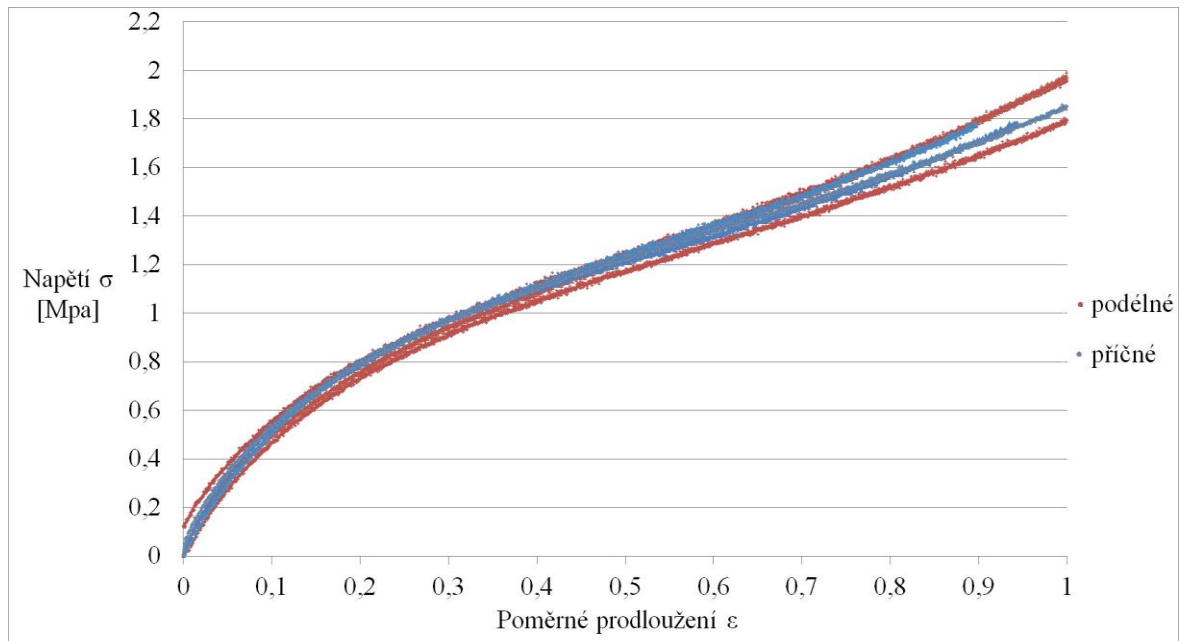


Obr. 22 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál G

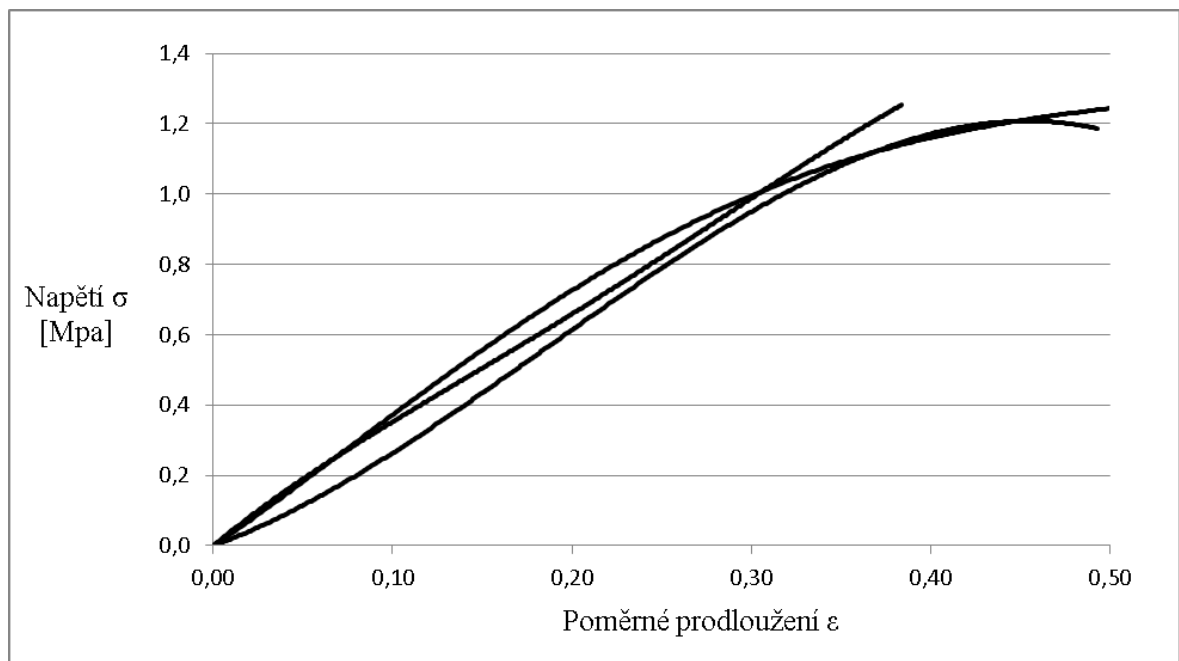


Obr. 23 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvousé napjatosti pro materiál G

3.6 Materiál H

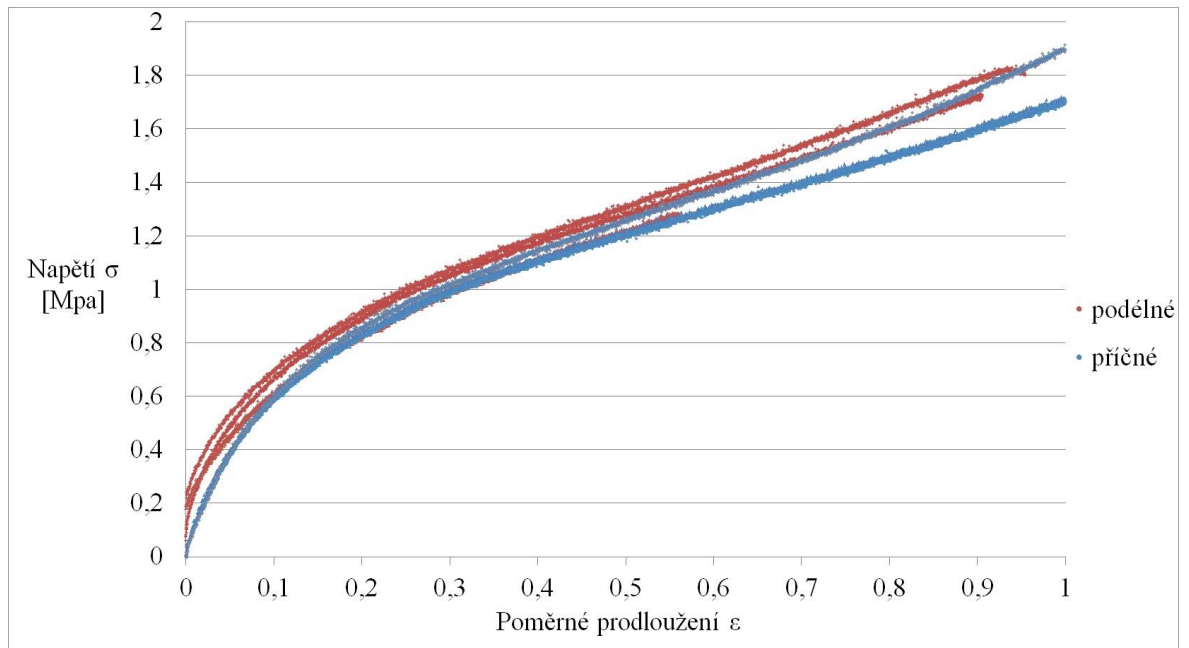


Obr. 24 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál H

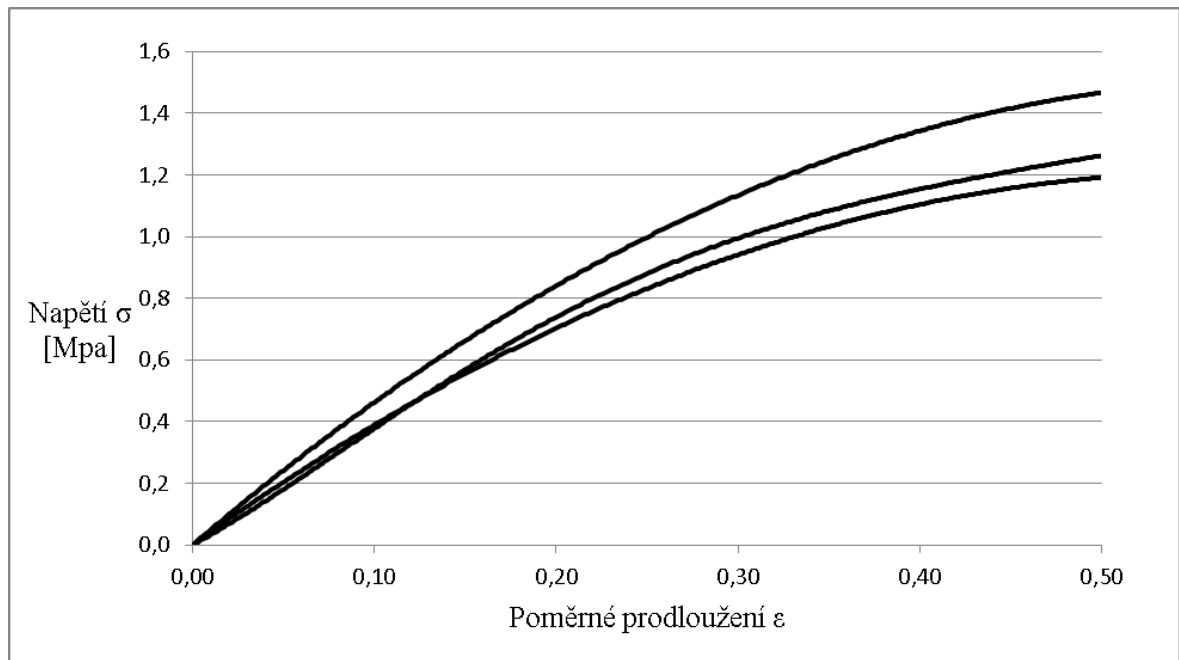


Obr. 25 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvuosé napjatosti pro materiál H

3.7 Materiál I



Obr. 26 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál I



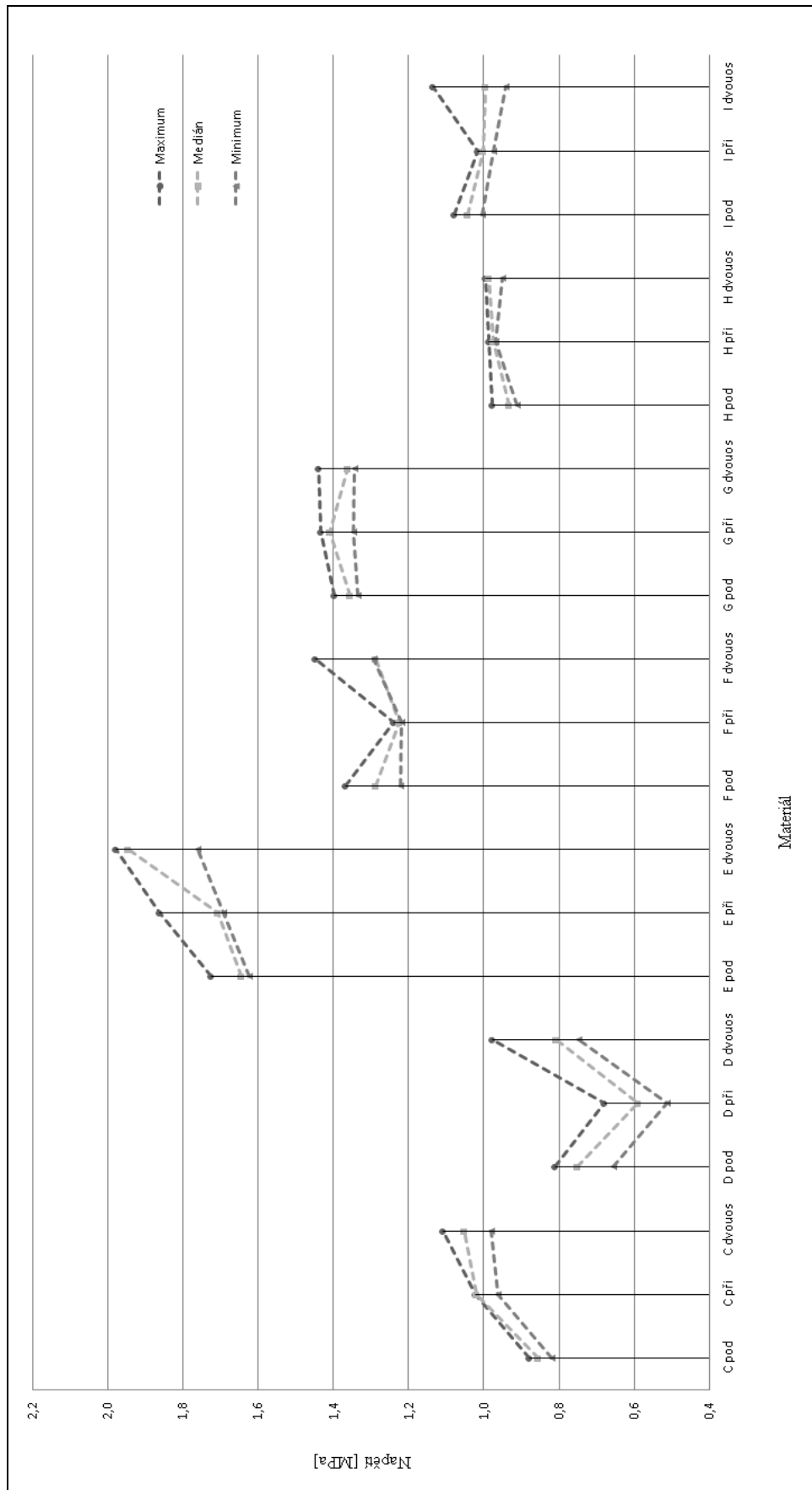
Obr. 27 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro materiál I

3.8 Napětí materiálů při určitých Modulech

Modul $\varepsilon = 30 \%$

Napětí při Modulu $\varepsilon = 30 \%$ v MPa			
Název	Minimum	Medián	Maximum
C pod	0,8199	0,8561	0,8789
C při	0,9629	1,0204	1,0221
C dvouos	0,9817	1,0518	1,1094
D pod	0,6549	0,7498	0,8113
D při	0,5111	0,5904	0,6787
D dvouos	0,7481	0,8062	0,9785
E pod	1,6249	1,6442	1,7255
E při	1,6932	1,7088	1,8620
E dvouos	1,7606	1,9465	1,9773
F pod	1,2222	1,2882	1,3669
F při	1,2175	1,2252	1,2402
F dvouos	1,2930	1,2870	1,4476
G pod	1,3344	1,3563	1,3981
G při	1,3476	1,4092	1,4346
G dvouos	1,3430	1,3622	1,4401
H pod	0,9108	0,9318	0,9788
H při	0,9695	0,9756	0,9855
H dvouos	0,9496	0,9877	0,9960
I pod	1,0044	1,0437	1,0775
I při	0,9736	1,0000	1,0156
I dvouos	0,9413	0,9947	1,1342

Tab. II Naměřené hodnoty napětí při modulu $\varepsilon = 30 \%$ v čistém smyku a dvouosé napjatosti

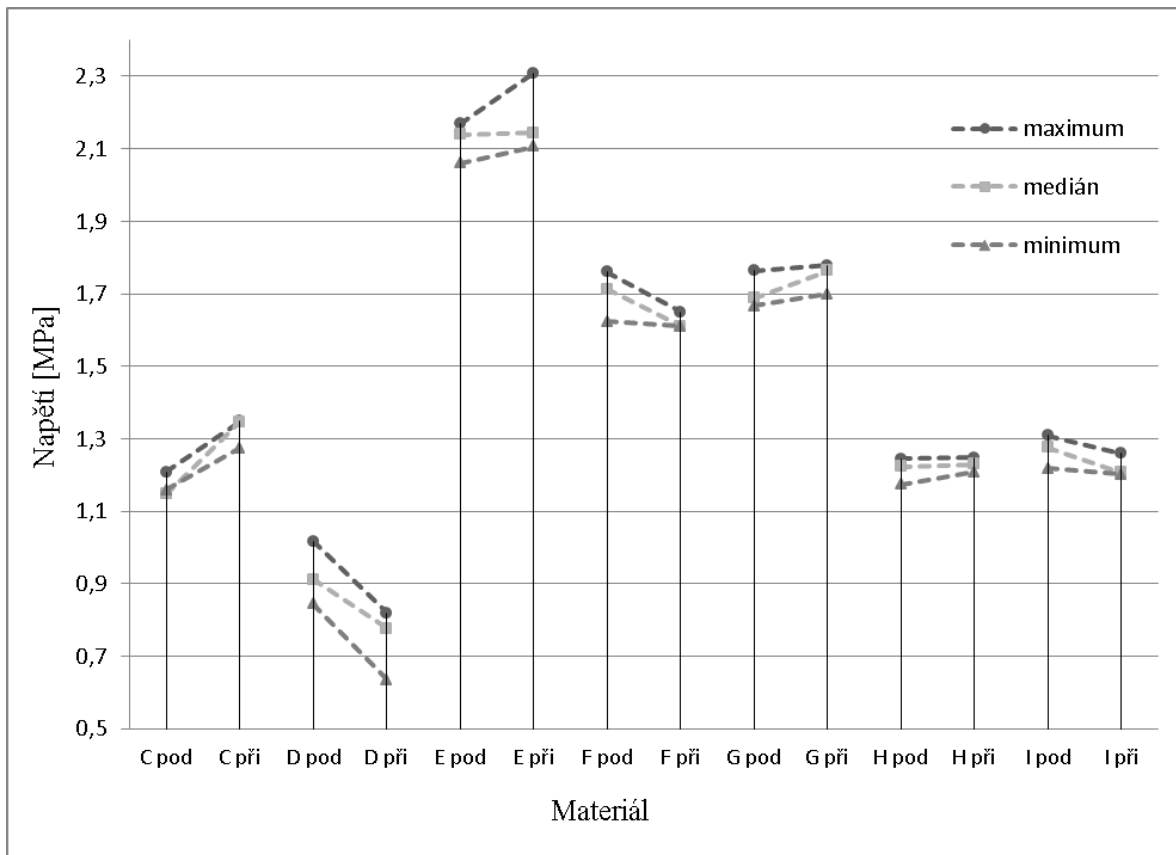


Obr. 28 Napětí při Modulu $\epsilon = 30\%$ v čistém smyku a dvouosé napjatosti

Modul $\varepsilon = 50 \%$

Napětí při Modulu $\varepsilon = 50 \%$ v MPa			
Název	Minimum	Medián	Maximum
C pod	1,1581	1,1472	1,2089
C při	1,2746	1,3467	1,3491
D pod	0,8439	0,9112	1,0165
D při	0,6355	0,7765	0,8195
E pod	2,0597	2,1385	2,1695
E při	2,1061	2,1435	2,3089
F pod	1,6232	1,7120	1,7600
F při	1,6096	1,6107	1,6501
G pod	1,6667	1,6882	1,7639
G při	1,6996	1,7628	1,7789
H pod	1,1741	1,2236	1,2442
H při	1,2084	1,2295	1,2476
I pod	1,2178	1,2761	1,3086
I při	1,2016	1,2060	1,2590

Tab. III Naměřené hodnoty napětí při modulu $\varepsilon = 50 \%$ v čistém smyku

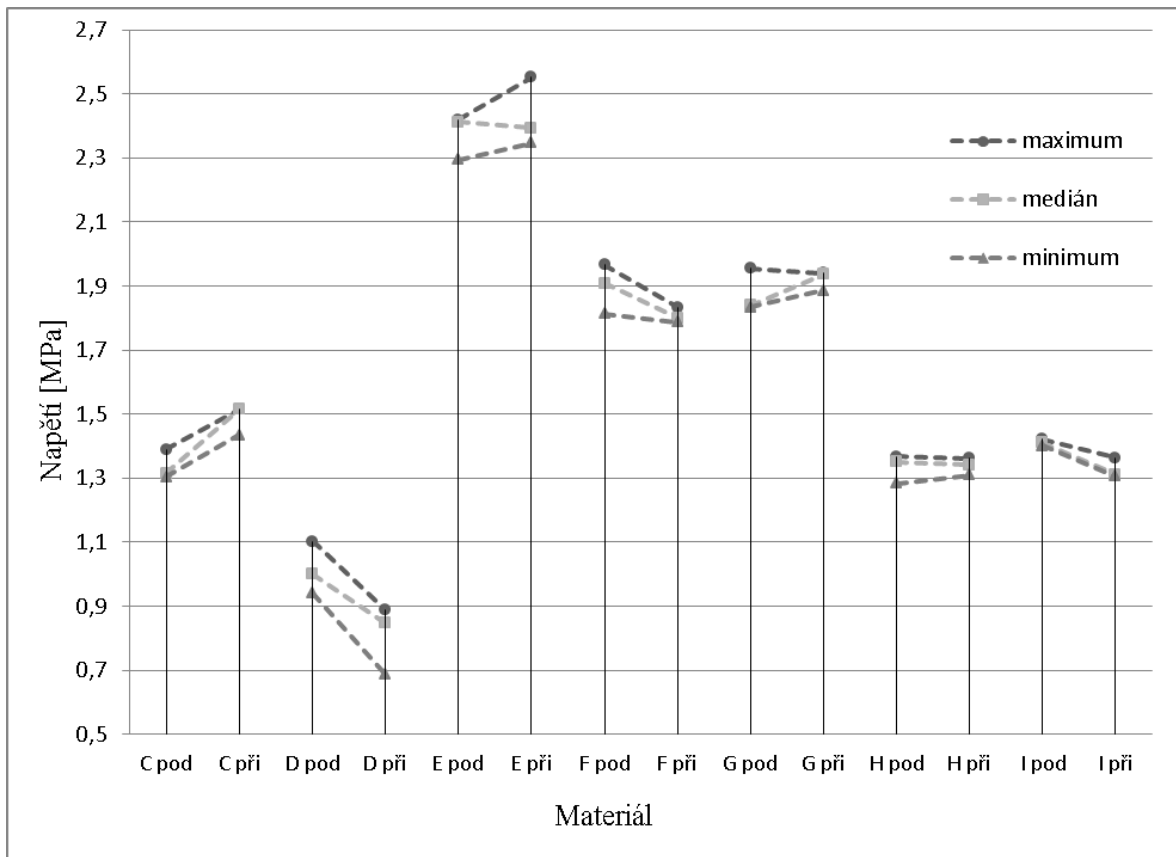


Obr. 29 Napětí při Modulu $\varepsilon = 50 \%$ v čistém smyku

Modul $\varepsilon = 60 \%$

Napětí při Modulu $\varepsilon = 60 \%$ v MPa			
Název	Minimum	Medián	Maximum
C pod	1,3046	1,3158	1,3906
C při	1,4335	1,5145	1,5156
D pod	0,9402	0,9994	1,1032
D při	0,6869	0,8464	0,8887
E pod	2,2949	2,4121	2,4100
E při	2,3470	2,3932	2,5526
F pod	1,8129	1,9083	1,9662
F při	1,7871	1,8004	1,8338
G pod	1,8335	1,8398	1,9558
G při	1,8868	1,9355	1,9401
H pod	1,2836	1,3501	1,3669
H při	1,3097	1,3412	1,3616
I pod	1,4011	1,4109	1,4207
I při	1,3056	1,3114	1,3628

Tab. IV Naměřené hodnoty napětí při modulu $\varepsilon = 60 \%$ v čistém smyku



Obr. 30 Napětí při Modulu $\varepsilon = 60 \%$ v čistém smyku

VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Materiály byly podrobeny zkoušce z čistého smyku, kde byl kladen důraz na směr válcování daných vzorků a dvouosé napjatosti. Pro srovnání obou metod nejlépe poslouží obr. 28 a tab II., kde jsou obě metody porovnávány při Modulu 30 %. Z tohoto grafu vyplývá, že napětí ve zkoušce z čistého smyku bylo v průměru menší než z dvouosé napjatosti.

Materiál C při Modulu 30 % má nejmenší hodnoty napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování a to od hodnot 0,82 MPa až po hodnoty 0,88 MPa, pro příčný směr jsou výsledky vyšší a to od hodnot 0,96 MPa až po hodnoty 1,02 Mpa. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou hodnoty napětí od 0,98 Mpa až 1,11 Mpa a hodnota mediánu při zkoušce čistého smyku z příčného směru je nižší než hodnota mediánu ve zkoušce z dvouosé napjatosti.

Materiál D při Modulu 30 % má hodnoty napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování od 0,65 MPa až 0,81 MPa, pro příčný směr jsou výsledky od hodnot 0,51 MPa až po hodnoty 0,68 Mpa, což je nejmenší hodnota napětí všech materiálů. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou hodnoty napětí od 0,74 Mpa až 0,98 Mpa, ovšem výsledky tohoto měření jsou nejméně přesné ze všech materiálů, z důvodu nejvyššího rozpětí minima a maxima. Hodnota mediánu je zde největší ze zkoušky dvouosé napjatosti a nejmenší ze zkoušky čistého smyku z příčného směru.

Materiál E při Modulu 30 % má hodnoty napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování od hodnot 1,62 MPa až po hodnoty 1,73 MPa, pro příčný směr jsou výsledky od hodnot 1,69 MPa až po hodnoty 1,86 Mpa. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou hodnoty napětí od 1,76 Mpa až 1,98 Mpa. Tento materiál má nejvyšší výsledky napětí ze všech testovaných materiálů. Hodnota mediánu roste od podélného směru válcování čistého smyku, po příčný směr válcování až ke dvouosé napjatosti.

Materiál F při Modulu 30 % má hodnoty napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování od 1,22 MPa až 1,37 Mpa a pro příčný směr od 1,22 Mpa až 1,25 Mpa. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou hodnoty napětí od 1,29 Mpa až 1,45 Mpa. Hodnota mediánu je zde nejvyšší ze zkoušky čistého

smyku u podélného válcování, menší hodnota je u zkoušky z příčného válcování i dvouosé napjatosti.

Materiál G při Modulu 30 % má napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování od hodnot 1,33 MPa až po hodnoty 1,40 MPa, pro příčný směr jsou výsledky od hodnot 1,35 MPa až po hodnoty 1,43 Mpa. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou výsledky od 1,34 Mpa až 1,44 Mpa. Hodnota mediánu je zde nejvyšší ze zkoušky čistého smyku z příčného válcování a nejmenší hodnota mediánu je ze zkoušky čistého smyku z podélného válcování.

Materiál H při Modulu 30 % má hodnoty napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování od 0,91 MPa až po 0,98 MPa, pro příčný směr jsou výsledky od hodnot 0,97 MPa až po 0,99 Mpa. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou hodnoty napětí od 0,95 Mpa až 1,00 Mpa. Hodnota mediánu je zde nejvyšší ze zkoušky dvouosé napjatosti a nejmenší ze zkoušky čistého smyku z podélného válcování.

Materiál I při Modulu 30 % má hodnoty napětí při testování z čistého smyku materiálu válcovaného v podélném směru se směrem natahování od 1,00 MPa až 1,08 MPa, pro příčný směr jsou výsledky od hodnot 0,97 MPa až po hodnoty 1,02 Mpa. Ve zkoušce z dvouosé napjatosti jsou hodnoty napětí 0,94 Mpa až 1,13 Mpa. Hodnota mediánu je zde nejvyšší ze zkoušky čistého smyku z podélného válcování a nejmenší ze zkoušky dvouosé napjatosti.

ZÁVĚR

Z výsledků měření nelze jednoznačně říct, jestli hodnoty napětí v čistém smyku z podélného válcování jsou vyšší než z příčného. Pro jednotlivé materiály je hodnota mediánů napětí vyšší ve směru podélném se směrem válcování než ve směru příčném u materiálů: D, F a I. Nejvyšší hodnoty napětí byly naměřeny u materiálu E, nejnižší u materiálu D.

Seřazené hodnoty materiálů podle velikosti napětí ze zkoušky čistého smyku u Modulu 30 % od nejmenšího po největší (podle hodnot mediánů): D (0,67 MPa), C (0,94 MPa), H (0,95 MPa), I (1,02 MPa), F (1,26 MPa), G (1,38 MPa), E (1,68 MPa). Hodnoty napětí při Modulu 50 % a 60 % téměř nezměnily pořadí materiálů.

Seřazené hodnoty materiálů podle velikosti napětí ze zkoušky čistého smyku u Modulu 60 % od nejmenšího po největší (podle hodnot mediánů): D (0,92 MPa), H (1,35 MPa), I (1,36 MPa), C (1,42 MPa), F (1,85 MPa), G (1,89 MPa), E (2,40 MPa).

Výsledky měření ze zkoušky dvouosé napjatosti jsou ve většině případů větší než ze zkoušky čistého smyku. Rozpětí výsledků z dvouosé napjatosti je ovšem vyšší.

Seřazené hodnoty materiálů podle velikosti napětí ze zkoušky dvouosé napjatosti u Modulu 30 % od nejmenšího po největší (podle hodnot mediánů): D (0,81 MPa), H (0,99 MPa), I (0,99 MPa), C (1,05 MPa), F (1,29 MPa), G (1,36 MPa), E (1,95 MPa).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Prekop, Š. a kolektiv. Gumárenská technológia I, Žilina, 1998, 282 s.
ISBN 80-7100-483-9.
- [2] Boström, S. Kautschuk Handbuch, 4. vydání, Stuttgart, 1961, 416 s.
- [3] Schätz, M. Kaučuk, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965
- [4] Gent, A.N. Engineering with Rubber – How to design Rubber Components, New York, 1992, 334 s. ISBN 0-19-520950-8.
- [5] Maláč, J. Gumárenská technologie, [cit. 2015-05-08], dostupný z WWW:
www.utb.cz/file/36213_1_1/
- [6] Špaček, J. Technologie gumárenská a plastikářská II. Brno: Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980
- [7] Franta, I. Gumárenské suroviny, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979
- [8] Kroisová, D. Příklady do polymerů, [cit. 2015-05-08], dostupný z WWW:
http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NEM.htm
- [9] Gent, A., N. Engineering with rubber. Munich: Carl Hauser Verlag, 2001. 365s.
ISBN 3-446-21403-8
- [10] Kohnke, P. ANSYS – Theory reference. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 1998. 965 s.
- [11] Morton, M. Rubber technology. 2. vyd. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1973. 603 s.
- [12] Dvořák, Z., Javořík, J. Elastomerní konstrukční materiály, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2009

- [13] Štěpek, J. Zpracování plastických hmot, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966
- [14] Kliment, J. Saze, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2008
- [15] Ducháček, V. Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2006
- [16] Ducháček, V., Svoboda, J. Korozní sborník pryží, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2007
- [17] Ducháček, V. J. Vulkanizační činidla, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2003

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

W	měrná deformační energie [J/m ³]
I _i	deformační invariant pro materiálové modely
λ _i	poměrné protažení
σ _{ij}	napětí ve směru ij [Pa]
E _{ij}	Lagrangeův deformační tenzor
l	délka pracovní části po protažení [m]
l ₀	délka pracovní části před protažením [m]
P	tlak [Pa]
E	modul pružnosti v tahu [Pa]
ε	poměrná deformace
σ	napětí [Pa]
μ	počáteční smykový modul [Pa]
F	síla [N]
S	plocha průřezu pracovní části [m ²]
p	tlak [Pa]
r	poloměr [m]
t	tloušťka materiálu [m]
λ _L	limitní síťové protažení
c _i	materiálová konstanta [Pa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 cis-1,4-polyisopren	13
Obr. 2 Čepování latexu	13
Obr. 3 Butadienový kaučuk (BR)	14
Obr. 4 Butadienstyrenový kaučuk (SBR)	15
Obr. 5 Chloroprenový kaučuk (CR)	17
Obr. 6 Isoprenový kaučuk (IR)	17
Obr. 7 Jednoosá napjatost	26
Obr. 8 Dvouosá napjatost	27
Obr. 9 Čistý smyk	28
Obr. 10 Křivka vztahu napětí a deformace	28
Obr. 11 Zkušební vzorek pro čistý smyk	36
Obr. 12 Zkušební vzorek pro dvouosou napjatost	38
Obr. 13 Schéma zkušebního zařízení pro dvouosou napjatost	39
Obr. 14 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál C	41
Obr. 15 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. C ...	41
Obr. 16 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál D	42
Obr. 17 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. D ...	42
Obr. 18 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál E	43
Obr. 19 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. E ...	43
Obr. 20 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál F	44
Obr. 21 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. F ...	44
Obr. 22 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál G	45
Obr. 23 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. G ...	45
Obr. 24 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál H	46

Obr. 25 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. H	46
Obr. 26 Závislost napětí na poměrném prodloužení v čistém smyku pro materiál I	47
Obr. 27 Závislost napětí na poměrném prodloužení při dvouosé napjatosti pro mat. I	47
Obr. 28 Napětí při Modulu $\varepsilon = 30\%$ v čistém smyku a dvouosé napjatosti	49
Obr. 29 Napětí při Modulu $\varepsilon = 50\%$ v čistém smyku	50
Obr. 30 Napětí při Modulu $\varepsilon = 60\%$ v čistém smyku	51

SEZNAM TABULEK

Tab. I Informace o směsích	35
Tab. II Naměřené hodnoty napětí při Modulu $\varepsilon = 30\%$ v čistém smyku a dvouosé napjatosti	48
Tab. III Naměřené hodnoty napětí při Modulu $\varepsilon = 50\%$ v čistém smyku	50
Tab. IV Naměřené hodnoty napětí při Modulu $\varepsilon = 60\%$ v čistém smyku	51

SEZNAM PŘÍLOH