

Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů

Barbora Kotlánová

Bakalářská práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Barbora Kotlánová**
Osobní číslo: **T16079**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů**

Zásady pro vypracování:

- Literární přehled
- Příprava experimentu
- Experiment
- Vyhodnocení výsledků

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

SMITH, L. P. The language of rubber: an introduction to the specification and testing of elastomers. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993, x, 255 s. ISBN 0-7506-1413-7.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

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 22. 5. 2019

.....

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 nevydělčně 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 vzdělávacího 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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá stanovením mechanických vlastností vybraných elastomerů. Teoretická část práce pojednává o kaučucích, gumárenských směsích, všeobecně o problematice mechanických modelů a mechanických zkouškách elastomerních materiálů. V praktické části byly elastomery testovány na jednoosou a dvouosou napjatost a čistý smyk. Výsledky byly zkompletovány a zaneseny do tabulek a grafů.

Klíčová slova: elastomer, hyperelastocita, jednoosý tah, čistý smyk, dvouosý tah

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with determination of mechanical properties of selected elastomers. Theoretical part of thesis deals with rubbers, rubber compounds, in general about problems of mechanical models and mechanical tests of elastomeric materials. In the practical part, the elastomers were tested for uniaxial and biaxial stress and pure shear. The results were completed and included in tables and graphs.

Keywords: elastomer, hyperelasticity, uniaxial tension, pure shear, equibiaxial tension

Ráda bych poděkovala panu doc. Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D. za jeho příkladný a příjemný přístup, cenné rady a připomínky při vedení mé práce. Také bych chtěla poděkovat Ing. Františkovi Vavříkovi za pomoc s vysekáváním a přípravou zkušebních tělísek. A především bych chtěla poděkovat mé rodině za psychickou a materiální podporu při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KAUKYKY	11
1.1 PŘÍRODNÍ KAUKYKY	11
1.1.1 Výskyt a výroba	11
1.1.2 Speciální druhy.....	12
1.2 SYNTETICKÉ KAUKYKY	13
1.2.1 Kaukyky pro všeobecné použití	13
1.2.2 Speciální kaukyky	14
2 GUMÁRENSKÉ SMĚSI	17
2.1 PLNIVA.....	18
2.2 ANTIDEGRADANTY.....	18
2.3 ZMĚKČOVADLA	19
2.4 VULKANIZAČNÍ SYSTÉMY.....	19
2.4.1 Vulkanizační činidla.....	19
2.4.2 Urychlovače vulkanizace	19
2.4.3 Aktivátory a retardéry vulkanizace	20
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	21
3.1 HYPERELASTICITA.....	21
3.1.1 Modely	22
3.1.2 Druhy modelů.....	23
3.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	27
3.2.1 Jednoosá napjatost.....	28
3.2.2 Čistý smyk.....	29
3.2.3 Dvouosá napjatost	30
3.3 DIC – KORELACE DIGITÁLNÍHO OBRAZU	32
3.3.1 Princip a popis zařízení	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
4 CÍL PRÁCE	36
4.1 MATERIÁL.....	36
4.2 ZKOUŠKA TAHEM	36
4.2.1 Zkušební zařízení a podmínky měření	36
4.2.2 Zkušební tělíska	37
4.2.3 Postup měření.....	37
4.2.4 Zpracování výsledků	38
4.3 ZKOUŠKA ČISTÝM SMYKEM.....	38
4.3.1 Zkušební zařízení a podmínky měření	38
4.3.2 Zkušební tělíska	38
4.3.3 Postup měření.....	39
4.3.4 Zpracování výsledků	39

4.4	ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI.....	40
4.4.1	Zkušební zařízení a podmínky měření	40
4.4.2	Zkušební tělíska	41
4.4.3	Postup a podmínky měření.....	42
4.4.4	Zpracování výsledků	42
5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	43
5.1	SMĚS B1.....	43
5.1.1	Tah.....	43
5.1.2	Čistý smyk.....	47
5.1.3	Dvouosá napjatost	47
5.1.4	Provedené zkoušky.....	47
5.2	SMĚS B2.....	48
5.2.1	Tah.....	48
5.2.2	Čistý smyk.....	52
5.2.3	Dvouosá napjatost	52
5.2.4	Provedené zkoušky.....	52
5.3	SMĚS B3.....	53
5.3.1	Tah.....	53
5.3.2	Čistý smyk.....	57
5.3.3	Dvouosá napjatost	57
5.3.4	Provedené zkoušky.....	57
5.4	SMĚS B4.....	58
5.4.1	Tah.....	58
5.4.2	Čistý smyk.....	62
5.4.3	Dvouosá napjatost	62
5.4.4	Provedené zkoušky.....	62
5.5	SMĚS B5.....	63
5.5.1	Tah.....	63
5.5.2	Čistý smyk.....	67
5.5.3	Dvouosá napjatost	67
5.5.4	Provedené zkoušky.....	67
5.6	SMĚS B6.....	68
5.6.1	Tah.....	68
5.6.2	Čistý smyk.....	72
5.6.3	Dvouosá napjatost	72
5.6.4	Provedené zkoušky.....	72
5.7	SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT VŠECH MATERIÁLOVÝCH SMĚSÍ	73
6	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	74
	ZÁVĚR	76
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ	81
	SEZNAM TABULEK.....	85
	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

ÚVOD

Elastomery jsou velkou skupinou polymerních materiálů s obrovským využitím ve všech odvětvích průmyslu. Základem pro výrobu elastomerů jsou kaučuky, a to jak přírodní, získané z prvotní suroviny latexu, tak syntetické, získané chemickým procesem polymerace. Poté, co jsou kaučuky přimíchány do gumárenských směsí, které obsahují různé přísady v závislosti na tom, jaké vlastnosti jsou od výsledného materiálu očekávány, proběhne vulkanizace – vytváření chemických vazeb a síťování.

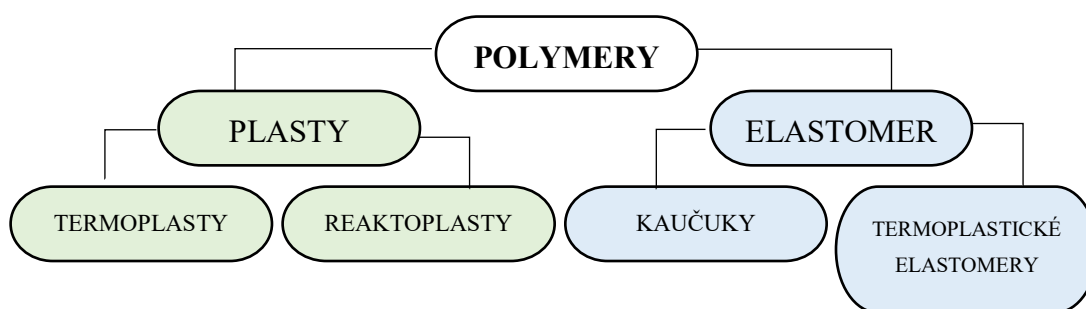
Elastomerní materiály jsou typické schopností velmi velké vratné deformace při nízké hodnotě zatížení. Proto jsou, mimo jiné, široce uplatňovány jako tlumiče vibrací či nárazů. Závislost napětí na deformaci je tedy silně nelineární a pro elastomery nelze aplikovat Hookův zákon, vycházející právě z lineární závislosti. Tyto velké deformace, při malém napětí nazýváme hyperelasticitou.

Mechanické vlastnosti elastomerů jsou dány použitými přísadami v gumárenské směsi a hmotnostním zastoupením jednotlivých složek. Elastomery tedy nejsou standardizovány, tak jako například oceli, a přesné složení materiálu bývá často výrobním tajemstvím. Před aplikací či konstrukčním využitím je tedy nutné zjistit materiálové konstanty pomocí různých mechanických zkoušek. Také nesmí být opomenuto, že mechanické vlastnosti elastomerů mohou být značně ovlivněny teplotou, a proto jsou i mechanické zkoušky běžně prováděny při různých teplotách.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KAUČUKY

Kaučuk je materiál přírodní, nebo syntetický. Patří do skupiny polymerů se speciálními a unikátními vlastnostmi nazývanými elastomery. Nejtypičtější vlastností elastomerů je elastická deformace, kdy po skončení působení vnější síly se zdeformované těleso vrátí do původního tvaru, a to platí pro elastomery z vulkanizované i nezvulkanizované. Samotný kaučuk není zesíťovaný, je lepkavý v teplejším prostředí a v chladu je tuhý a nepružný. Pomocí vulkanizace (síťování) se z kaučuků stávají pryže. Pryže jsou amorfní, izotropní a ve velkém rozmezí teplot pružnější než surové kaučuky. Hlavní rozdělení kaučuků je na přírodní, nebo syntetické. S velkým rozmachem syntetických kaučuků se také udává dělení na kaučuky speciální a pro běžné použití. [1,9]



Obrázek 1 – Rozdělení polymerů.

1.1 Přírodní kaučuky

V přírodě získáváme kaučuk z řady rostlin v podobě latexu. Nejznámější a nejvýznamnější je strom *Hevea Brasiliensis* (kaučukovník brazilský) dosahující výšky 30 m. Přírodní latex svým vzhledem a konzistencí připomíná mléko či hustou smetanu. Přírodní kaučuk má zkratku NR (natural rubber) a je to nejstarší druh kaučuku pokrývající velkou část celkové výroby. [1, 9]

1.1.1 Výskyt a výroba

Strom *Hevea Brasiliensis* byl objeven v Jižní Americe, poté byly založeny plantáže po obou stranách rovníku v tropických oblastech Ameriky, Afriky a Asie. Ze stromu, který vzhledem připomíná náš ořechovník, získáváme přírodní latex pomocí zářezů do kmene ve tvaru V anebo spirál a následným čepováním (Obr. 2). Složení latexu závisí na více faktorech – věku stromu, čepovacím čase, počasí, druhu plantáže.



Obrázek 2 – Kaučukovník brazilský [11]

Latex je koloidní systém, to znamená, že se jedná o suspenzi kaučukových částic ve vodném prostředí. Ve vodném prostředí, které nazýváme sérum, je rozpuštěno několik dalších látek jako jsou cukry, bílkoviny, alkoholy a jiné. Také obsahuje velké množství vody, proto je potřeba jej před dopravením z plantáže zkoncentrovat. Pro zpracování latexu se používá několik způsobů jako odpaření, odstředění, nebo rozvrstvení. Přírodní kaučuk získáváme z latexu zasycháním, nebo srážením kyselinami, solemi, alkoholy anebo pomocí jiných činidel, poté se vysuší na materiál nazývaný krepa. Jeho dalšími úpravami získáváme přírodní pryž. Tyto přímé způsoby zpracování latexu se využívají hlavně díky své jednoduchosti, nízkým nákladům a ekologii. [1,4]

1.1.2 Speciální druhy

Kaučuky rozlišujeme dle způsobu zpracování a podle jeho technických vlastností. Mezi speciální druhy řadíme kaučuky se speciálními vlastnostmi, které plní specifické podmínky zpracovatele. Do této kategorie patří lehce zpracovatelný kaučuk, který má zlepšené zpracovatelské vlastnosti pro vytlačování a lisování. Olejem nastavený přírodní kaučuk, epoxidovaný přírodní kaučuk a deproteizovaný přírodní kaučuk.

1.2 Syntetické kaučuky

Syntetické kaučuky vznikly jako náhrada přírodního kaučuku. První syntetický kaučuk byl polyisopren a byl vyroben v Německu roku 1909 a v Rusku (1910) to byl polybutadien. Avšak první komerčně úspěšný byl Du Pontův neopren v roce 1931. Du Pont také později sám představil rozdělení syntetických kaučuků na 9 odlišných skupin.

Pomocí plastifikátorů, stabilizátorů a pomocných látek mohou mít některé aplikace syntetických kaučuků lepší vlastnosti než přírodní. Vyrábějí se uměle, chemickým postupem. Z petrochemických surovin dostaneme monomery pro následnou polymeraci.

Syntetické kaučuky dělíme do dvou základních skupin, které jsou kaučuky speciální a pro všeobecné použití. Ale v dnešní době je v ASTM (American Society for Testing and Materials) zaznamenáno 8 obecných rozdělení se 44 podtřídami. Všechny druhy uvedených kaučuků se mezi sebou dají kombinovat do gumárenských směsí za účelem zlepšení vlastností. [1, 9, 16]

1.2.1 Kaučuky pro všeobecné použití

Z kaučuků pro všeobecné použití vyrábíme většinu běžně užívaných pryžových výrobků. Vyjímají se nízkou cenou a velkou spotřebou. Používáme je na zdravotnické materiály, izolace, pneumatiky, lepidla, nátěrové hmoty a jiné.

Mezi všeobecné kaučuky řadíme:

- BR – Butadienový kaučuk
Používá se téměř ve všech gumárenských směsích s jinými kaučuky, protože ve své samostatné formě je hůře zpracovatelný. Vyrábí se roztokovou polymerací za pomoci kovových katalyzátorů. Ze všech kaučuků má nejnižší teplotu zesklnění, proto pro skladování je potřeba speciálně vyztužených kontejnerů. Nejvíce je aplikován na výrobu pneumatik.
- EPM, EPDM – Ethylen-propylenový kaučuk a ethylen-propylen-dienový kaučuk
EPM se vyrábí kopolymerizací ethylenu a propyleny. Na množství polypropylenových jednotek závisí vlastnosti EPM, pro amorfnost více jak 25 hmot.% PP. Vulkanizace EPM se provádí peroxidy nebo radiací.
EPDM termopyler vzniká, pokud se v řetězci nachází mimo ethylen a propylen i nekonjugovaný dien. EPDM je ethylen-propylen-dienový kaučuk, kde obsah dienu ur-

čuje vzrůstající rychlost vulkanizace. Také se dobře zpracovává, jeho zpracovatelnost můžeme zlepšit přidáním oleje. Je odolný proti vodě, stárnutí a únavě vlivem kyslíku a ozónu.

Vyznačují se termostabilitou a vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi.

- SBR – Butadien-styrenový kaučuk

Patří k velmi používaným syntetickým kaučukům. Butadien a styren patří k velmi ochotně polymerujícím a kopolymerujícím monomerům pomocí nejrůznějších mechanismů a způsobů. Lze z nich vyrobit velkou škálu látek (plastů, elastomerů) a proto klasifikujeme SBR kaučuky na spoustu podmnožin. Kaučuk se vyrábí emulzní polymerizací butadienu se styrenem a vzniká ve formě latexu. SBR má velmi podobné vlastnosti jako přírodní kaučuk, jeho nevýhody jsou menší odolnost proti vzniku trhlin a únavě při větších deformacích.

- IR – Isoprenový kaučuk

Svémi vlastnostmi nejvíce podobný přírodnímu kaučuku. Patří mezi jediné syntetické kaučuky, které můžeme označovat za umělé. K výrobě využíváme dva typy iniciačních systémů – katalyzátory Zieglerova typu a alkyllítiové katalyzátory. Isoprenový kaučuk je méně lepivý, pomaleji vulkanizuje a jeho modul pružnosti v tahu je nižší a tažnost vyšší než u přírodního kaučuku, ale je ekonomicky náročnější než přírodní kaučuky. [1, 9]



Obrázek 3 – Výrobky z kaučuků pro všeobecné použití [9]

1.2.2 Speciální kaučuky

Pro speciální aplikace, kdy nejsou vlastnosti kaučuků pro všeobecné aplikace dostačující, využíváme kaučuky speciální. Jedná se o případy, kdy je potřeba jistá odolnost vůči olejům a teplotám. Speciální kaučuky se dělí na teplovzdorné a olejovzdorné.

Teplovzdorné využíváme na výrobu tepelně namáhaných vodičů a součástek, také v lékařství na implantáty a čočky. Olejovzdorné aplikujeme na výrobu hadic, obuvi, neoprenů, těsnění. [1, 9]

Dělíme je tedy na teplovzdorné:

- FPM – Fluorouhlíkový kaučuk

Vyrábějí se emulzní radikálovou kopolymerací. Mezi specifické vlastnosti FMP patří dlouhodobá vysoká odolnost za vysokých teplot, které se mohou pohybovat až ke 230 °C a také vynikající chemická a olejová odolnost.

Jsou řazeny k nejdražším kaučukům. Mezi aplikace patří opláštění drátů a kabelů, olejovzdorné těsnění a vnitřní vrstvy palivových hadic u automobilů.

- Q – Silikonové kaučuky

Jeho charakteristickou vlastností je, že fyzikální vlastnosti závisí minimálně na teplotě. Teplotní rozmezí běžného používání je -60 °C až 180 °C. Díky své odolnosti se aplikují při vyšší teplotách v suchém prostředí. Ve vlhku podléhají větší degradaci. Pro své izolační vlastnosti a tepelnou odolnost se používají u tepelně namáhaných součástek a izolaci vodičů. Pro dobrou snášenlivost s lidským organismem je najdeme v lékařství a pro běžné užití.

A olejovzdorné:

- CR – Chloroprenový kaučuk

Řadíme jej mezi nejstarší syntetické kaučuky a v dnešní době je vyráběný emulzní polymerací. Je velmi elastický, málo hořlavý a dosahuje vysoké pevnosti a získáváme jej z emulzní polymerace. CR se používá pro těsnění a membrány, protože je dobře odolný proti povětrnostním vlivům.

- NBR – Butadien-akrylonitrilový kaučuk

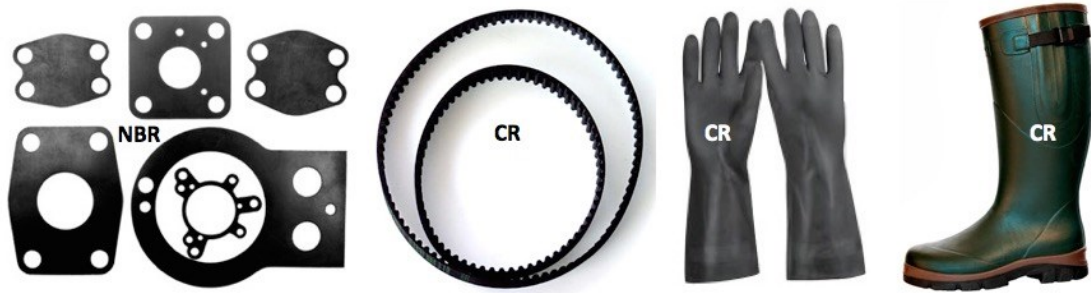
Jedná se o statistický kopolymer pro speciální použití vyráběný emulzní polymerací. Je velmi odolný vůči nabobtnávání v olejích a nepolárních rozpouštědlech a teplovzdorný. Nejčastější aplikace je v automobilovém průmyslu na různé těsnění odolné vůči olejům a benzínu.

- ACM – Akrylátový kaučuk

Polymer a kopolymer esterů kyseliny akrylové vyráběný polymerací v emulzi, nebo suspenzi. Odolávají současně olejům a vyšším teplotám, proto využití najdeme v automobilovém průmyslu.

- OT – Polysulfidový kaučuk

Patří mezi nejstarší syntetické kaučuky vyráběné polykondenzační reakcí polysulfidu sodného a organického dichloridu. Výborně odolávají vůči bobtnání v olejích a polárních rozpouštědlech. Jejich další předností je dobrá odolnost proti povětrnostním podmínkám. [1, 9]



Obrázek 4 – Výrobky ze speciálních kaučuků [9]

2 GUMÁRENSKÉ SMĚSI

Z čistého kaučuku nemůžeme vytvořit pryž. Je potřeba gumárenské směsi, která umožní vulkanizaci a dá kaučuku potřebné vlastnosti. Směs obsahuje kaučuk, vulkanizační činidla, stabilizátory, plastifikátory a další pomocné látky jako jsou plniva, pigmenty, které zlepšují vlastnosti kaučukové směsi a její zpracovatelnost. Každá jednotlivá směs plní svou určitou funkci. Jednotlivé látky je potřeba vybírat s ohledem na zpracovatelnost, požadované vlastnosti a ekonomiku. [2, 3]



Obrázek 5 – Přísady gumárenské směsi [15]

Koncentraci jednotlivých složek ve směsi označujeme jako dsk (díly na sto dílu kaučuků), nebo phr (parts per hundred rubber). V gumárenské směsi je vždy 100 dílu kaučuku, mohou být kombinace více kaučuků.

Nejdůležitějším aspektem pro tvorbu kaučukové směsi je volba samotného kaučuku, podle které se odvíjí zbytek směsi. Kaučuk tvoří základ směsi, vybíráme jej podle požadavků zákazníka, technologie zpracování, odolnosti, teplotního rozsahu a mechanických charakteristik. Vybíráme kaučuk, který se nejvíce blíží stanovenému profilu vlastností. Nemusíme vybírat pouze jeden typ kaučuku, můžeme použít jejich kombinaci a mít pro základ kaučukovou směs.

Průběh vývoje kaučukové směsi:

- dle zadaných vlastností je připravena směs
- provede se provozní zkouška a případná úprava směsi
- vyrobí se zkušební série a upraví se podmínky procesu
- nakonec je výrobek ozkoušen v praxi a podle toho jsou provedeny další úpravy směsi a procesu

2.1 Plniva

Základními složkami směsi jsou kaučuk, vulkanizační systém a změkčovadla. Tato základní směs by pro většinu technických aplikací byla nepoužitelná, proto využíváme přidání plniv, které splní další požadavky a změní vlastnosti kaučukové směsi. Plniva pomáhají zlepšit mechanické vlastnosti, elektrické vlastnosti, zpracovatelnost a dynamické vlastnosti. Je potřeba plniva volit s rozvahou, v potřebném množství, protože jejich účinek může mít i negativní dopad na vulkanizát. Nejčastěji přidáváme plnivo ve formě prášku. Plniva rozlišujeme na aktivní a neaktivní, ale v praxi spíše užíváme rozdělení na světlá plniva a saze. [1, 2, 3]

- Saze – Vznikají neúplným spalováním uhlovodíkových sloučenin. Pro vulkanizáty mají různé vlastnosti závislé na surovině, z které jsou vyrobeny.
- Světlá plniva – Jsou to všechny nesazová plniva s různou chemickou stavbou. Dříve sloužili k dosažení světlejších barev a zlevnění vulkanizovaných výrobků. Používají se od počátku gumárenského průmyslu, řadíme mezi ně např. křídou, baryt, bělobu, oxid křemičitý.

2.2 Antidegradanty

Antidegradanty, nebo také stabilizátory dlouhodobě chrání pryž proti vnějším vlivům a stárnutí, které mají neblahý vliv na mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, tvrdost, změny povrchu, aj.). 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 pryž používáme, rozhodujeme o použití antidegradantů a nebo celkového antidegradačního systému. [1, 2, 3]

2.3 Změkčovadla

Jsou to přísady, které zlepšují zpracovatelnost směsi a zmenšují její tuhost. Pro tuto úlohu používáme nízkomolekulární látky anebo tuhé látky, které musí být s kaučukem míchatelné. Využíváme produkty ze zpracování ropy, dřeva a přírodní tuky a oleje. Snižují viskozitu, tvrdost a jejich modul pružnosti a zvyšují tažnost. [5]

2.4 Vulkanizační systémy

Kaučuky, syntetické i přírodní, se v praxi používají ve formě vulkanizátů. Na tyto výrobky se kladou vyšší požadavky ohledně tvrdosti, pevnosti a celkové odolnosti. K dosahování těchto požadovaných vlastností u vulkanizátů pomáhají vhodné kombinace kaučuků a vulkanizační přísady. Do této skupiny můžeme zařadit vulkanizační činidla, urychlovače, aktivátory a retardéry. [1, 2, 3]

2.4.1 Vulkanizační činidla

Jedná se o základní složky samotné vulkanizace, které jsou schopny vytvořit chemickou reakci příčných vazeb mezi molekulami uhlovodíků v kaučuku. Vulkanizace mění vlastnosti kaučuku z převážně plastických na elastické.

Nejběžnější materiály pro vulkanizační činidla jsou: síra, selen, telur, peroxidy, oxidy kovů, reaktivní pryskyřice. Každý prvek má jiný vliv na vulkanizát, a používáme různé prvky pro různé kaučuky. Nejčastěji je využívána elementární síra. [1, 2, 3]

2.4.2 Urychlovače vulkanizace

Řadíme je mezi nejdůležitější prvky vulkanizace. Účinky urychlovače mají podstatně velký vliv na průběh vulkanizace a vlastnosti daného vulkanizátu. Zvětšují rychlost a síťovací účinnost celé vulkanizace. Také zkracují čas a v některých případech snižují teplotu reakce. Podle technologických požadavků a vlastností pryže můžeme pomocí urychlovačů změnit průběh vulkanizace, což ovlivní kladně vlastnosti pryže a zvětší její odolnost.

Urychlovače se dají dělit podle několika kritérií, na základě chemického složení, účinnosti v procesu, tvaru vulkanizační křivky. Jednotlivé urychlovače se dají kombinovat mezi sebou a vzájemně se mohou ovlivňovat. V odborné literatuře rozdělujeme podle chemického složení a v praxi podle aktivity ve vulkanizačním procesu. Aktivita urychlovače je dána typem použitého kaučuku, konkrétního složení směsi a podmínek reakce. [1, 2, 3]

Praktické dělení urychlovačů dle aktivity:

- pomalé (guanidy, aldehydaminy)
- rychlé (tiazoly, sulfonamidy)
- velmi rychlé (tiuramy)
- ultra rychlé (xantogenany, ditiokarbamany)

2.4.3 Aktivátory a retardéry vulkanizace

Aktivátory jsou organické a anorganické látky, které pomáhají zmenšit závislost rychlosti vulkanizace na teplotě. Aktivují ve směsích účinek vulkanizačních činidel a tím pádem zvyšují účinek síťovací reakce. Jako aktivátory používáme anorganické sloučeniny-oxidy kovů (ZnO, MgO, aj.), z organických sloučenin používáme mastné kyseliny a jejich soli, aminoalkoholy a aminy.

Retardéry, také známé jako inhibitory vulkanizace, regulují zpracovatelskou bezpečnost (navulkanizace) směsi a pomáhají zabránit předčasnému navulkanizování směsi. [1, 2, 3]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ

Vlastnosti elastomerů se velmi liší od ostatních materiálů. Jejich vlastnosti můžeme rozdělit do dvou skupin, a to fyzikální a chemické.

Fyzikální nebo také mechanická vlastnost je charakterizována pružností, plasticitou, pevností, tvrdostí a houževnatostí. Vyhodnocených vlastností je ovšem mnohem více a např. pružnost popisujeme jako modul pružnosti v tahu nebo tlaku E [MPa], modul pružnosti ve smyku je G_S [MPa] a objemový modul pružnosti K [MPa] a také Poissonovo číslo jako koeficient příčné kontrakce ν , které dosahuje hodnot 0,5. Proto většinu materiálů můžeme považovat za objemově nestlačitelné. Dané vlastnosti se stanovují a ovlivňují různými faktory během celého vývoje (výroby, použití, prodeje) experimentálně. Abychom mohli zkoušky správně vyhodnocovat a opakovat vše podléhá normám a normalizovanému postupu.

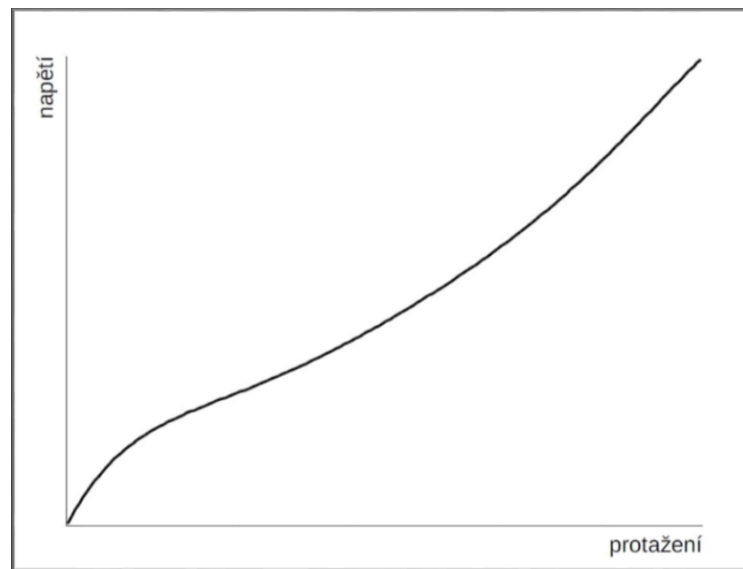
Chemickou vlastností je stabilita a jistá odolnost elastomeru v různých prostředích, elektrické vlastnosti, nepropustnost pro kyseliny, odolnost vůči agresivním vlivům.

Vlastnosti nejsou standardizovány, proto je potřeba před každým použitím elastomer otestovat a zjistit potřebné materiálové konstanty. Zjištěné vlastnosti se mohou lišit a měnit podle způsobu výroby a jsou ovlivněny danou směsí a působením vedlejších vlivů jako je teplota, čas, tlak. Souhrn těchto vlastností nazýváme hyperelasticitou. [8]

3.1 Hyperelastická

Mezi hlavní přednosti kaučuků patří vysoká elasticita, nazývána hyperelastická, která je jejich charakteristickou vlastností. Je to schopnost snášet opakovaně značnou deformaci při dlouhé životnosti. Hlavními znaky hyperelasticity jsou:

- velké elastické (vratné) deformace
- vysoké hodnoty tažnosti (několik set procent)
- závislost napětí na deformaci je nelineární – esovitý průběh (Obr. 6)
- deformace už s malými silami
- vysoká objemová tuhost (lze považovat za nestlačitelné)



Obrázek 6 – Závislost napětí a deformace u elastomerů [8]

Z výše uvedených vlastností můžeme prohlásit, že nelze využít Hookova zákona, protože chování materiálu vykazuje nelineární závislost a jsou zde podstatně velké deformace. Přesto je vztah použitelný pro aplikace, pro přesnější výpočty je třeba použít nelineární popis závislosti napětí a deformace. [8]

3.1.1 Modely

Vývoj nelineárních hyperelastických materiálových modelů probíhá velmi intenzivně již od 2. pol. 20. století a různými autory bylo navrženo nepřehledné množství těchto modelů. Modely jsou založeny na různých fyzikálních aspektech a konstantách.

Materiálové modely jsou založeny na definici vztahu pro měrnou deformační energii W , která je funkcí deformačních invariantů, nebo hlavních protažení.

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

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

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

Poměr deformované délky l_i ve směru osy ku původní délce l_0 je protažení λ_i .

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

Definice deformačních invariant pomocí rovnic:

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

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

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

Pro nestlačitelné materiály je invariant $I_3 = I$.

V případech kdy známe funkci W , je možné napětí spočítat jako derivaci této funkce podle odpovídající složky deformace.

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

Ve vztahu vidíme, že S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složkami pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru.

Jestliže zvolíme souřadný systém shodně s hlavními směry deformace, nastane, že je definován pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor takto:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Z rovnice (7) můžeme odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí, což je skutečné napětí.

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

p je nespecifikovaný tlak určený okrajovými podmínkami, δ_{ij} je Kronekerovo delta, kde platí ($\delta_{ij} = 1, i = j; \lambda_{ij} = 0, i \neq j$). [7, 10]

3.1.2 Druhy modelů

Jednotlivé modely se od sebe liší dle definic funkce měrné deformační energie W . Některé hyperelastické modely jsou založeny na mikrochemických modelech vnitřní struktury elastomerů, do této kategorie zahrnujeme např. modely Neo-Hookean a Arruda-Boyce. Těmto materiálovým konstantám přiřazujeme jasný fyzikální význam. Další skupinu tvoří modely fenomenologické. Zde nalezneme modely, jakou jsou např. Mooney-Rivlin, Polynomický, Ogden, Yeoh, Gent a ty jsou navrženy na základě pozorování deformačně napěťového chování

elastomerů na makroskopické úrovni, aby model co nejvíce přiblížil pozorování. Avšak jejich materiálové konstanty nenesou fyzikální význam. [7, 10]

- Polynomický model

Polynomická funkce je založena na deformačních invariantech (I_1, I_2) a z praktického hlediska se využívá u deformací dosahujících hodnot ke 300 %.

Model je definován:

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

kde c_{ij} značí hodnoty materiálových konstant a za N dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna, ovšem N většinou nedosahuje vyšších hodnot než 3.

- Neo-Hookean

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší model, který lze zařadit jako podmnožina polynomického modelu. Je založen na termodynamických principech a na statickém přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. Neo-Hookean model aplikujeme na deformace do 40 % v jednoosém namáhání, jinak není použitelný. Není také schopen správně pochytit závěrečnou vyztužovací fázi napět'ově deformační odezvy elastomerů a při smykové deformaci se nám jeví lineárním chováním.

Funkce W má formu:

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

počáteční smykový modul označujeme μ a má formu

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

kde n značí počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota.

- Yeoh

Další model podobný polynomické funkci, nebo také redukovaný polynomický model. Nepřináší tolik přesné výsledky a vyhodnocení bývá složitější. Naopak jeho forma je jednodušší a nevyužívá druhého deformačního invariantu. Tří-parametrový model využíváme pro vyhodnocování výsledků pro větší deformace, není vhodný pro menší deformace.

Vztah pro tento model je:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (13)$$

materiálová konstanta je určena jako c_{i0} a za N znovu dosazujeme hodnoty jako u polynomické funkce a o model Neo-Hookean se jedná tehdy, jestliže $N = 1$.

- Mooney-Rivlin

Fenomenologický model se dvěma parametry založený na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace byl navržen Mooneyem a později upraven Rivlinem. Můžeme jej zařadit jako speciální případ polynomické funkce, využívající několika parametrů od dvou do devíti, kde počet parametrů je závislý na velikosti polynomu. Pro hodnoty deformací ke 300 % se používají pěti a devíti-parametrové modely.

Pro tahové deformace do 100 % je využíván dvou-parametrový model, který je také nejpoužívanější a je definován jako:

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

pro ekvivalenci k polynomickému modelu se $N = 1$ a materiálové konstanty se značí jako c_{10} a c_{01} .

Tří-parametrový model je shodný s polynomickou funkcí, pokud se $N = 2$ a materiálové konstanty $c_{20} = c_{02} = 0$:

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

Pěti-parametrový model má materiálové konstanty c a pro shodu s polynomickou formou se musí $N = 2$:

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

A devíti-parametrový model je ekvivalentní k polynomické funkci pro $N = 3$ a c jsou materiálové konstanty:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (17)$$

- Arruda-Boyce

Je to složitější model, který bývá uvažovaným rozšířením modelu Yeoh. Arruda-Boyce vychází z mikromechaniky vnitřní struktury elastomerů a je použitelný pro hodnoty deformací do 300 %.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (18)$$

kde μ vyjadřuje smykový modul a λ_L charakterizuje tzv. „limitní protažení“, kdy se síť přestává protahovat a napětí se přibližuje nekonečnu. Pokud se hodnoty λ_L rovnají nekonečnu stává se z Arruda-Boyce model Neo-Hookean. Konstanty C_i jsou reálného významu a jejich definice je:

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

- Gent

Tato formulace je podobná složitější formě Arruda-Boyce, kde vidíme podobnost u využití limitního síťového protažení. Model se vyznačuje schopností vystihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětíové deformační odezvy a díky použití dvou materiálových konstant jej můžeme řadit mezi ty jednodušší.

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right) \quad (20)$$

kde nám konstanta E značí modul pružnosti, který je 3μ pro nestlačitelné materiály. I_m se rovná limitní hodnotě členu $(I_1 - 3)$ a je ekvivalentní v Arruda-Boyce definici k λ_L .

- Ogden

Model, který je velmi široce využíván, založený na vyjádření v hodnotách hlavních protažení. Tato funkce dokáže poměrně dobře vystihnout chování elastomerů při velké škále deformací, které mohou dosahovat i vyšších hodnot až do 700 %. S určitými dosazeními hodnot se tento model stává analogickým k modelům Neo-Hookean a Mooney-Rivlin. Je aplikován vztahem:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (21)$$

kde μ_i a α_i nám značí materiálové konstanty, které nemají určitý fyzikální význam a za N dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna. [7, 10]

3.2 Mechanické zkoušky

Metody sloužící pro popis vlastností materiálů, nazýváme mechanické zkoušky. Zjišťujeme mechanické vlastnosti materiálu za použití působení vnějších sil. Mechanické zkoušky dělíme na zkoušky dynamické, statické a únavové. Pomáhají ke klasifikaci materiálů, z kterých vyrábíme výrobky. Jsou důležité ke kontrole jakosti, a i pro odběratele, který výrobek z daného materiálu používá. Také pomáhají sledovat pravidelnost technologických postupů. Elastomery se svými vlastnostmi a chováním při mechanických zkouškách liší od ostatních materiálů. Nejvýraznější vlastností je, že po skončení zatěžování se většinou vrací do původního tvaru.

Definice prodloužení, pevnosti v tahu, modulu a zkušební postupy, které mají být použity pro testování pryže jsou uvedeny v normě ISO 37. Tuto normu můžeme zařadit mezi základní zkušební normy pro gumárenský průmysl.

Při statických i dynamických zkouškách rozlišujeme několik aspektů, které mají na výsledky těchto zkoušek u elastomerů největší vliv. Jedná se o čas, kdy můžeme tvrdit, že obecně jsou vlastnosti elastomerů funkcí času. Proto je potřeba mechanické zkoušky provádět vždy v časových intervalech. Čas u mechanických zkoušek bereme jako rychlost změny velikosti působící síly, proto musíme zatěžovat vzorky pouze normalizovanou rychlostí. Při jiných rychlostech dostáváme jiných hodnot.

Dalším hlavním aspektem, který chování ovlivňuje, je rozměr tělesa. Respektive tvar a rozměry tělesa. Je potřeba rozlišovat tvary zkušebních těles, protože dle tvarů a rozměrů se mění i získané hodnoty pro stejná napětí.

Teplota patří mezi další parametr, který má značný vliv na mechanické chování elastomerů. Elastomery se při různých teplotách vyznačují různým chováním a samozřejmě vše záleží na typu (druhu) použitého elastomeru.

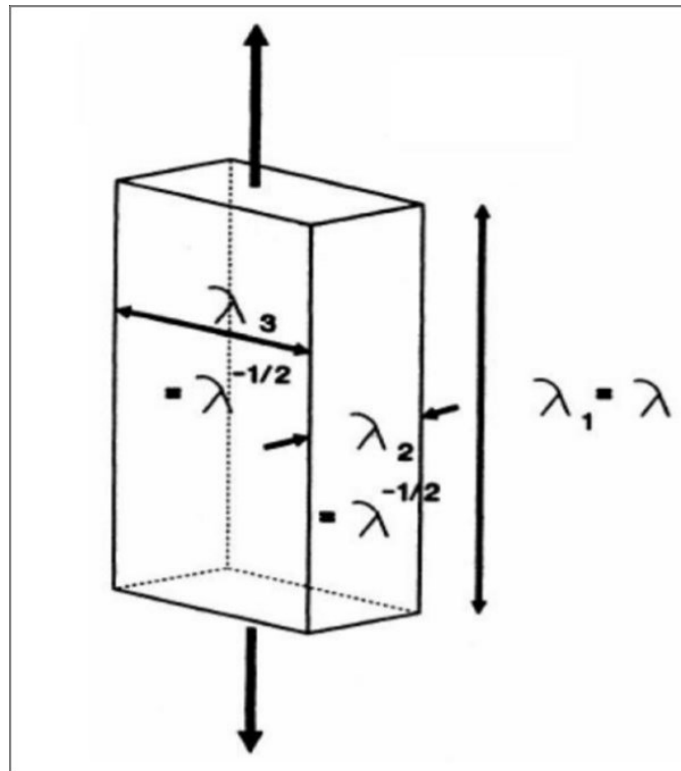
Elastomery běžně zkoušíme zkouškami statickými i dynamickými, mezi které zahrnujeme zkoušky v tahu, tlaku, smyku a torzí a zjišťujeme pevnost, tažnost, tvrdost, elasticitu, modul pružnosti a další pro nás důležité charakteristiky. [7, 16]

3.2.1 Jednoosá napjatost

Zkouškami jednoosé napjatosti rozumíme zkoušky, kdy je zkušební tělísko namáháno a deformováno ve směru jedné osy. Sem řadíme zkoušení tahem a tlakem s vlivem teploty. Jednoosá napjatost je charakterizována poměrným protažením $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$. Tato definice deformace je založena na stavu nestlačitelnosti, kdy se objem nemění a z toho plyne že $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$. Boční strany vzorku nejsou namáhány a pro tento stav napětí tedy platí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a definice rovnice pro napětí σ se stane rovnicí t , kde t značí skutečné napětí. [6, 7]

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

kde W je měrná deformační energie a I jsou deformační invarianty.



Obrázek 7 – Jednoosá napjatost [6]

V konkrétním případě tahu, kterým se budeme dále v praktické práci zabývat, se zkušební tělísko prodlužuje působením síly. Metody pro měření napětí v tahu pro pryže v Evropě jsou dány normou ISO 37. V této normě je uvedeno, jak má vypadat standardizované zkušební tělísko, metodika zkoušky (čas, teplota), čas na zotavení vzorku a jiné. [16]

Zkoušku provádíme na zkušebnách trhacích strojích a tělíska jsou rozměru oboustranných lopatek (osmiček). Zkouška patří mezi statické. Těleso zatěžujeme postupně vzrůstající silou

v opačném směru. Ze zaznamenaných hodnot sledujeme potřebné veličiny jako jsou napětí, poměrné prodloužení, tažnost a průtažnost. A ty charakterizujeme takto:

Napětí v tahu je definováno pomocí síly F a původního průřezu S_0 zkušebního tělesa a jednotkou je MPa.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (23)$$

Poměrné prodloužení vychází v procentech se značí písmenem ε a je vyjádřeno jako poměr změny délky Δl k původní délce l_0 .

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

Podle druhu elastomeru a jeho jakosti určujeme při různých prodlouženích tzv. modul. Při poměrných prodlouženích 50, 100 a 300 % stanovujeme modul pro elastomery, které mají tažnost do 400 %. Pro elastomery s tažností do 750 % stanovujeme modul při poměrných prodlouženích 100, 300 a 500 % a při poměrných prodlouženích 300, 500 a 700 % pro elastomery s tažností nad 750 %. Modul i pevnost mají stejné jednotky [MPa], počítáme s původním průřezem, i když je změna průřezu patrná, protože je obtížné změřit skutečný průřez během zkoušky. [7]

3.2.2 Čistý smyk

Je definován jako napětí aplikované ve směru 1 (Obr. 8) s podmínkami vůči změně šířky ve směru 2 ($\lambda_2=1$). Termín „čistý“ nám označuje stav, kdy hlavní osy napětí během deformace nerotují. Horizontální šířka vzorku je zřetelně větší (zhruba 10x) než jeho vertikální výška.

Při deformaci je poměrné prodloužení definováno jako: $\lambda_1=\lambda$, $\lambda_2=1$ a $\lambda_3=\lambda^{-1}$ a napětí $\sigma_3 = 0$. Zatímco napětí σ_2 je nenulové, což je způsobeno tuhými svorkami.

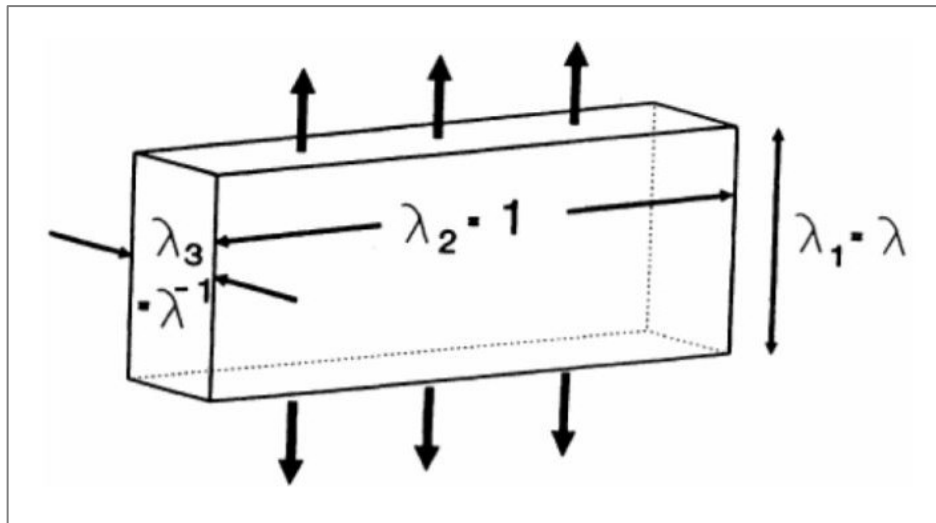
Skutečné napětí v protahovaném směru $t = t_1$ je dáno rovnicí:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (29)$$

A skutečné vedlejší napětí t_2 je:

$$t_2 = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (1 - \lambda^{-2}) \quad (30)$$

Opět vidíme, že vztah mezi napětím a deformací je nelineární. [6]



Obrázek 8 – Čistý smyk [6]

V praktické části bude zkouška probíhat tak, že zkušební tělísko bude upnuto po obou stranách ve stroji (Obr. 9) a v jednom směru bude natahováno. Při výpočtech se budeme řídit vzorci (23) a (27).



Obrázek 9 – Upnutí vzorku při smyku

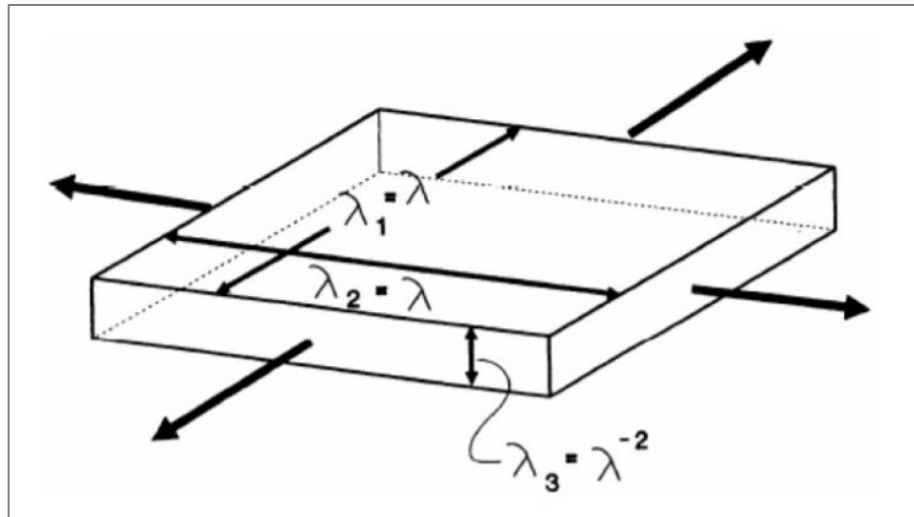
3.2.3 Dvousá napjatost

U dvouosé napjatosti hovoříme o dvouosém zatížení, kdy zatěžování tělesa probíhá dvěma směry. Definice poměrného protažení je $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = \lambda^{-1/2}$ a napětí $\sigma_3 = 0$, protože zde zkušební tělísko nezatěžujeme.

Skutečné napětí můžeme vyjádřit jako:

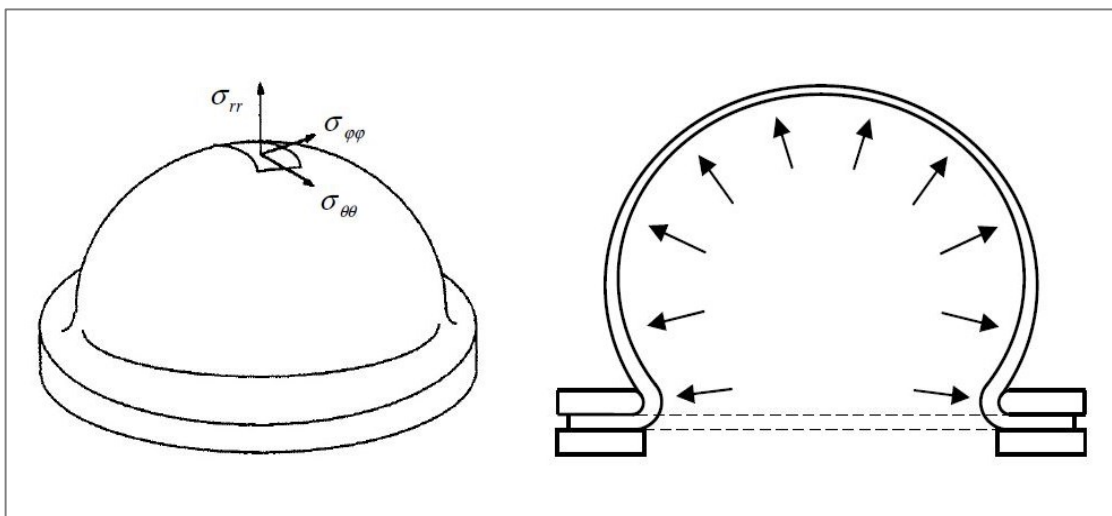
$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-4}) \quad (25)$$

Je potřeba si uvědomit, že je zde vysoká nelinearita mezi napětím a deformací. [6]



Obrázek 10 – Dvouosá napjatost [6]

Zkoušení dvouosé napjatosti lze provádět několika způsoby s různými zkušebními tělisky, a to tak, že čtvercové těleso roztáhneme do dvou navzájem kolmých směrů, nebo kruhové těleso roztáhneme radiálně ve směru od středu, či ploché těleso nafoukneme stlačeným vzduchem. Ze všech způsobů uvedených výše se budeme zabývat v praktické části zkouškou dle posledního třetího způsobu (Obr. 11), který je i konstrukčně jednodušší než předchozí dva. Snímání deformace během měření budeme provádět pomocí DIC zařízení, které je blíže popsáno v kapitole 3.3.



Obrázek 11 – Nafouknutí vzorku [8]

Při zavedení podmínky nestlačitelnosti materiálu, můžeme určit tloušťku, která je poměrem původní tloušťky a poměrného protažení a je dána vzorcem

$$t = \frac{t_0}{\lambda^2} \quad (26)$$

Poměrné protažení je dáno poměrem l a l_0

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

kdy l je délka pracovní části při protažení a l_0 je její původní délka.

Napětí je vyjádřeno obecnou rovnicí membránového napětí, kde tlak působící na zkušební tělísko značíme p , r značí poloměr oblouku, λ je poměrné prodloužení, t_0 původní tloušťka.

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{t_0} \quad (28)$$

3.3 DIC – korelace digitálního obrazu

Digitální obrazová korelace neboli DIC (digital image correlation) patří mezi experimentální optické a bezdotykové měřicí metody, založené na korelačním algoritmu, které pomáhají získat informace o vlastnostech a konstrukci materiálu, deformacích a posuvech, a to vše za použití techniky digitální korelace obrazu.

Metoda a princip DIC je známý od 80. let 20. stol., ale plné rozvinutí a vylepšení přichází až v posledních letech s dosáhnutým pokrokem v oblasti PC a digitální fotografie. Vzhledem k optimalizaci a modernizaci a kvalitě kamer s vysokým rozlišením, je tato metoda považována za velmi flexibilní, efektivní a přesnou oproti manuálním metodám měření a také je jednodušší pro uživatele.

Mezi hlavní výhody patří žádný kontakt s měřeným objektem, kde můžeme měřit libovolné místo sledované oblasti. Také to, že lze měřit materiálové vlastnosti na téměř každém materiálu, a to i u materiálů jako je dřevo, kovová pěna, pryž a CFRP. Můžeme měřit statické i dynamické aplikace zatěžování a jejich kombinování. Výhodou je také použitelnost mimo laboratoř, flexibilní konstrukce systému a neustálá možnost programovatelnosti a aktualizace softwaru. Měření je možné stále konfigurovat, přidávat vzorce a dopočítávat na základě pořízených fotografií. Tyto výhody oceníme, když se jedná o měření na těžko dostupných místech a je potřeba rychlých a přesných informací.

Praktické využití je v mechanice i mikroskopii. Aplikace nalezneme u charakterizace materiálových parametrů, lomové mechaniky, kde celobvodové měření poskytuje přesné a lokální informace o rozložení napětí a růstu trhlin. Jedná se např. o testování součástek a materiálových vlastností, deformací a analýz. [12, 13, 14]

3.3.1 Princip a popis zařízení

Pro měření bylo použito zařízení od firmy Sobriety s.r.o (Obr.12), které bylo pořízeno v rámci projektu RIFT (reg. č.: CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002324) pro inovaci výuky.

Zařízení se skládá ze stativu se senzory (kamery) a světly, skříňe s PC se softwarem. V našem případě používáme kamery dvě, ty lze ale zaměnit za jednu vysokorychlostní. Jádrem celého systému je software Mercury RT. Ten zaznamenává měření a provádí příslušné výpočty. Výpočty jsou definovány uživatelem dle vzorců, které můžeme naprogramovat v PC.

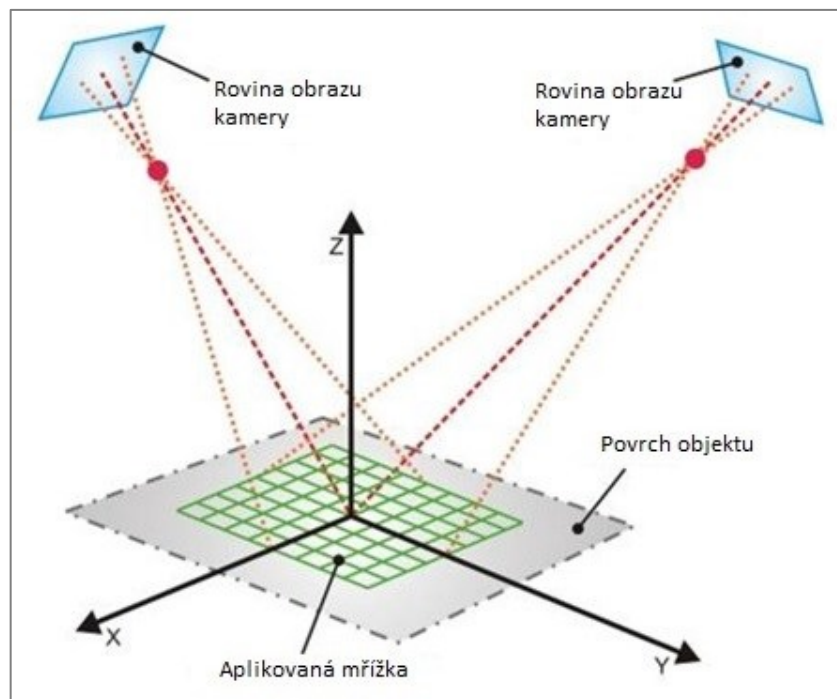


Obrázek 12 – Sestava DIC

Podstata celé metody spočívá ve snímání náhodného černobílého skvrnitého vzoru vytvořeného na povrchu objektu, který je zkoumán.

V měření pomocí DIC využíváme korelace, která měří vzájemný vztah dvou proměnných. Při použití náhodného vzoru může být poloha každého bodu objektu ve dvou snímcích identifikována pomocí korelačního algoritmu. Korelační algoritmus je založen na sledování šedé hodnoty $G(x, y)$ v malých lokálních sousedstvích.

Zkoumaná oblast se rozdělí virtuální mřížkou na fazety (menší podoblasti). Pomocí korelace a korelačního algoritmu těchto fazet před a po se určí posunutí jednotlivých bodů (Obr. 13). [12, 13, 14]



Obrázek 13 – Princip metody [12]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo stanovení mechanických vlastností daných elastomerů. Vlastnosti byly zjišťovány pomocí mechanických zkoušek uvedených v kapitole 3. Byly prováděny zkoušky jednoosé napjatosti (tah) při třech různých teplotách, dvouosé napjatosti (nafukování vzorku) a čistého smyku. Z těchto měření byla vyhodnocena charakteristika závislosti napětí na poměrné deformaci pro jednotlivé vzorky.

4.1 Materiál

Informace složení směsí pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 1: Složení jednotlivých kaučukových směsí

Směs	Kaučuk	Saze [dsk]
B1	SBR	103
B2	NR+SBR	74
B3	NR	25
B4	NR(IR)	50
B5	EPDM	34
B6	EPDM	40

4.2 Zkouška tahem

4.2.1 Zkušební zařízení a podmínky měření

Zkušebním zařízením pro tahovou zkoušku (jednoosá napjatost) byl trhací stroj ZWICK, který odpovídá normě ISO 7500-1 Třídy 1. Informace o přístroji jsou uvedeny v tabulce 2.

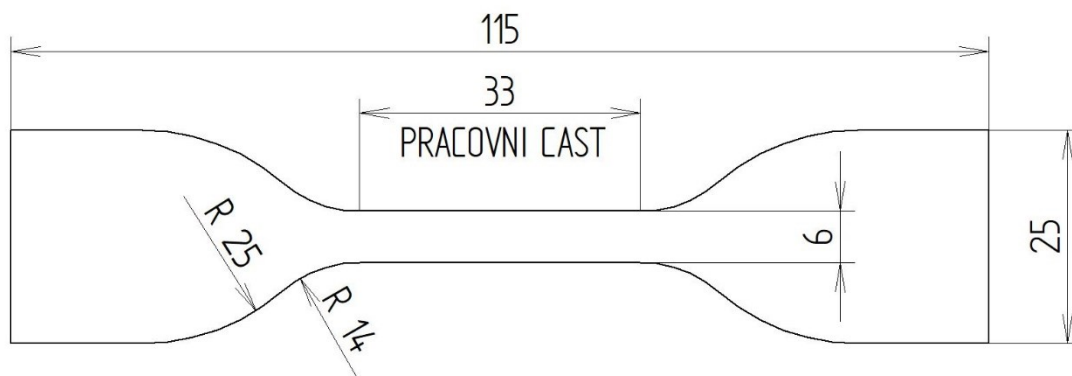
Měření probíhalo při třech různých teplotách, které byly nastaveny v teplotní komoře. Hodnoty teplot byly 24 °C, 70 °C a 100 °C.

Tabulka 2: Informace o zařízení

Název	ZWICK 1456
Maximální rychlost posuvu	800 mm/min
Maximální síla	20 kN
Rozsah teplotní komory	-80 až 250 °C
PC Software	testXpertII

4.2.2 Zkušební tělíska

Bylo vysekáno od každé ze šesti směsí 15 vzorků rovnoběžně se směrem válcování a 15 vzorků kolmo ke směru válcování. Zkušební tělíska měla tvar oboustranných lopatek (osmiček) a rozměry dle vysekávacího nože odpovídajícího normě ČSN ISO 37. Rozměry tělíska vidíme na Obrázku 14 a jsou uvedeny v milimetrech.



Obrázek 14 – Zkušební tělíska pro zkoušku tahem

4.2.3 Postup měření

1. V prvním kroku byla vysekána zkušební tělíska. Rozměry, tvar a počet jsou popsány v kapitole 4.2.2.
2. Dále byla nastavena v softwaru testXpert II metoda měření a rozměry jednotlivých zkušebních těles, které musely být přeměřeny posuvným měřidlem.
3. Zkušební tělíska byla vyhřáta na požadovanou teplotu.
4. Následně tělíska byla upnuta do čelistí stroje ZWICK 1456 s teplotní komorou.
5. Teplotní komoru bylo potřeba nastavit na požadovanou teplotu a před každým jednotlivým měřením bylo potřeba vyčkat na teplotu.
6. Test byl spuštěn po vytemperování teplotní komory na požadovanou teplotu.
7. Testování bylo cyklické. Zkušební tělíska byla protahována celkem 4x. V prvním cyklu bylo tělíska natahováno do 60 % původní délky, poté bylo odlehčeno a po odlehčení bylo v dalších cyklech protaženo 3x na 30 % původní délky.
8. Po skončení testu bylo tělíska vyjmuto z čelistí a vyměněno za další.
9. Měření probíhalo při třech různých teplotách a to pro 24 °C, 70 °C a 100 °C.

4.2.4 Zpracování výsledků

Dle teoretické části (kap. 3.2.1) bylo prováděno zpracování výsledků. Bylo vycházeno z 15 hodnot pro 30 % poměrného prodloužení a z 5 hodnot pro 60 % poměrného prodloužení pro každou směs. Z naměřených hodnot byly zpracovány výsledky a ty pak byly zaznamenány do tabulek a grafů (kap. 5).

4.3 Zkouška čistým smykem

4.3.1 Zkušební zařízení a podmínky měření

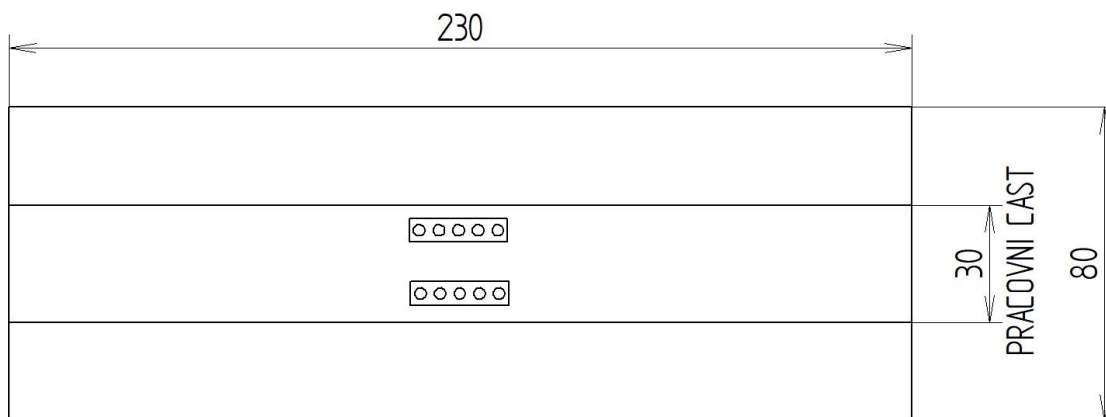
Při této zkoušce byl zkušebním zařízením stroj SHIMADZU AGS, který odpovídá normě ISO 7500-1 Třídy 1. Měření probíhalo za laboratorních podmínek a teploty 24 °C.

Tabulka 3: Informace o zařízení

Název	SHIMADZU AGS - 50kNXD
Rozsah zdvihu příčnicku	0 mm až 1000 mm
Rozsah rychlosti příčnicku	0,001 mm/min až 1600 mm/min
Šířka pracovního prostoru	425 mm
Maximální síla	50 kN
Přesnost	± 1 % indikované síly
PC Software	TRAPEZIUM

4.3.2 Zkušební tělíska

Z každé směsi bylo připraveno 6 zkušebních tělísek ve tvaru obdélníku. Tělíska byla vždy 3 podélně a 3 příčně se směrem válcování daného materiálu. Rozměry tělísek pro směsi B1 – B4 byly 230 mm x 80 mm a pro směsi B5 – B6 190 mm x 80 mm. Tloušťka se pohybovala v rozsahu 2,00 – 2,50 mm. Na každém zkušebním tělísku byly značky pro snímání posunutí digitální kamerou zkušebního stroje. Za spodní a horní okraj bylo tělísko uchyceno do čelistí zkušebního stroje.



Obrázek 15 – Zkušební tělísko pro zkoušku čistým smykem

4.3.3 Postup měření

1. Byla nastříhána z každé směsi zkušební tělíska požadovaných rozměrů (kap. 4.3.2). Dohromady bylo zkušebních tělísek 36.
2. Dále byla v softwaru TRAPEZIUM nastavena měřicí metoda a zkouška čistým smykem. Před každým měřením se přeměřila tloušťka tělesa a dané rozměry byly zadány.
3. Do čelistí stroje SHIMADZU AGS-50kNXD bylo uchyceno tělísko. Značky, které na něm byly přilepeny, snímala digitální kamera a vyhodnocovala tak protažení tělíska.
4. V dalším kroku byl spuštěn test a tělísko se natahovalo do poměrného protažení 30 %. Rychlost natahování jsme zvolili 20 mm/min.
5. Software TRAPEZIUM vyhodnocoval průběh závislosti napětí na poměrném protažení.
6. Při dosažení dané hodnoty poměrného protažení byl test ukončen.
7. Tělísko bylo vyjmuto a bylo upevněno další.

4.3.4 Zpracování výsledků

Výsledky byly zpracovány dle teoretické části (kap. 3.2.2). Z naměřených hodnot (původní délka, měřená délka pracovní oblasti zkušebního tělesa, průřez a síla) bylo vypočítáno poměrné prodloužení a napětí. Výsledky byly zaznamenány do tabulek a grafů (kap. 5).

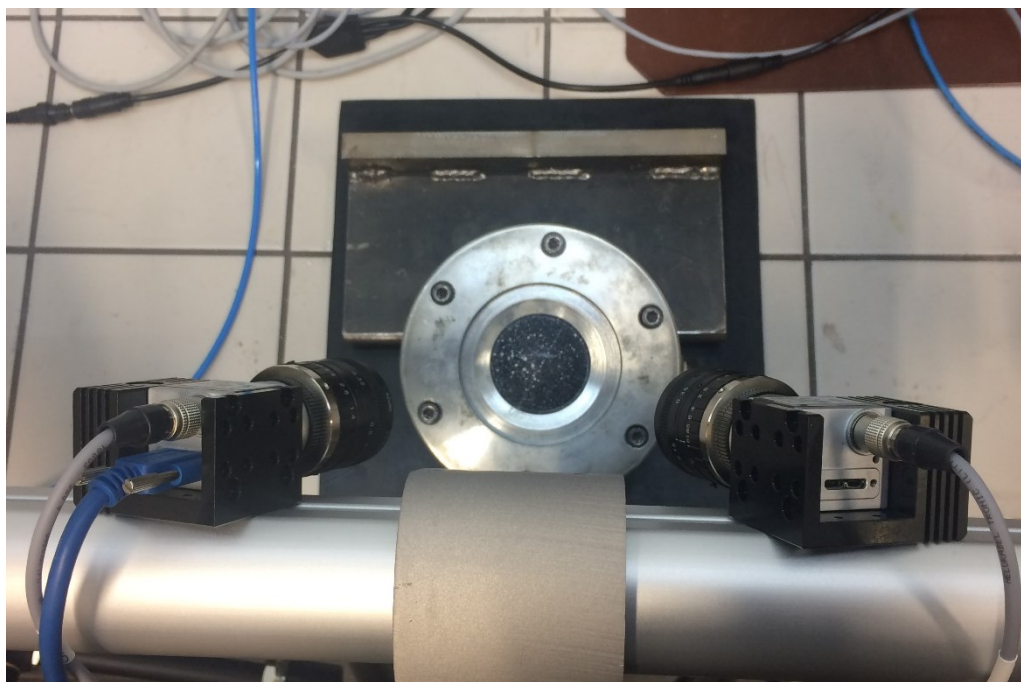
4.4 Zkouška dvouosé napjatosti

4.4.1 Zkušební zařízení a podmínky měření

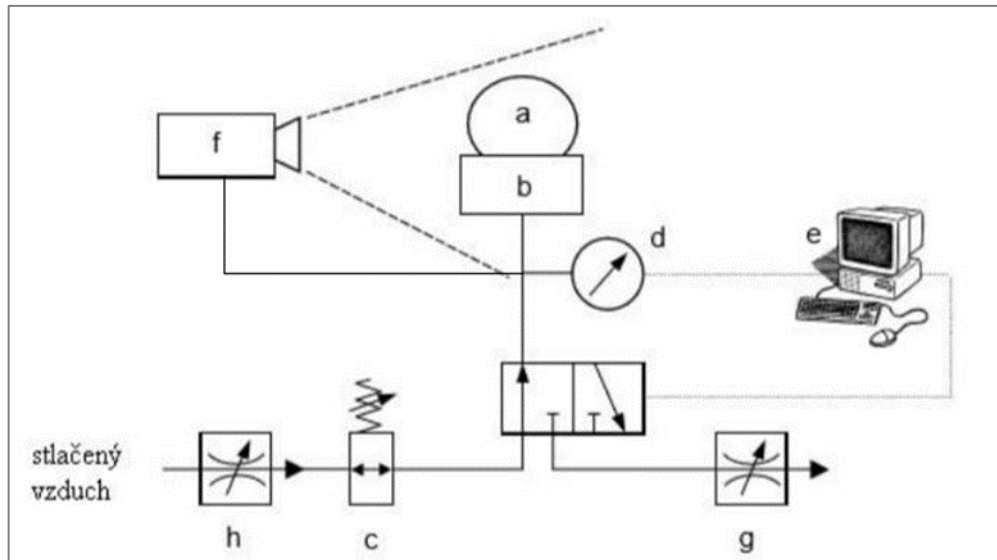
Pro zkoušku dvouosé napjatosti bylo vyvinuto speciální zařízení (Obr. 16). Zkušební tělísko je upnuto (Obr. 16) mezi 2 prstenci, na jednu stranu přivádíme vzduch pod tlakem a zkušební tělísko se nafukuje. Vše snímají kamery (Obr. 17), které zaznamenané informace přivádí do PC se softwarem Mercury RT a ten zaznamenává průběh deformace a měření tlaku snímačem (manometrem). Měření probíhalo za laboratorních podmínek a teploty 24 °C.

Tabulka 4: Informace o zařízení

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



Obrázek 16 – Upevnění vzorku a nastavení kamer



Obrázek 17 – Zařízení pro zkoušku dvousé napjatosti s DIC

4.4.2 Zkušební tělíska

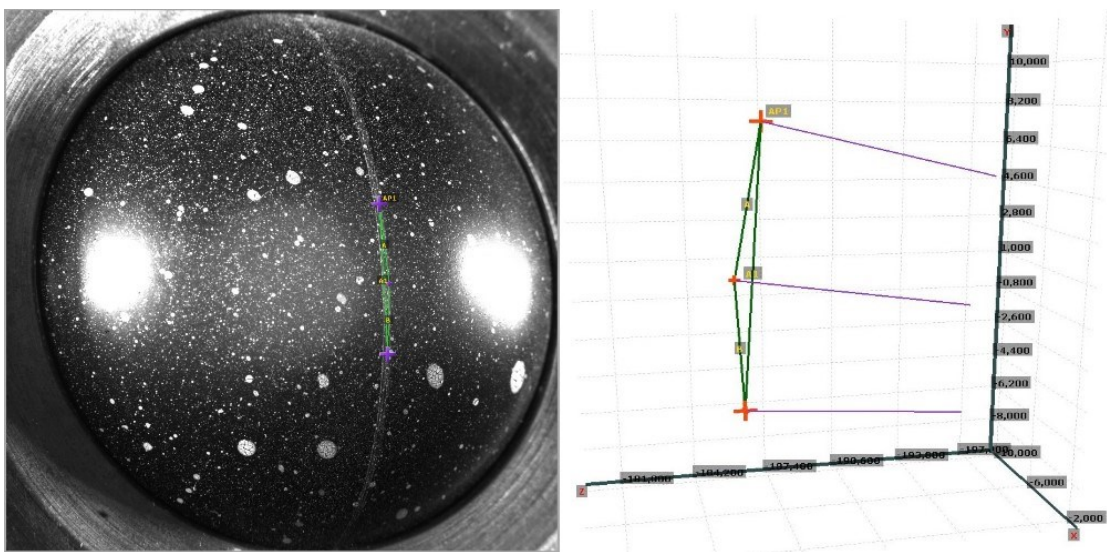
Zkušební tělíska měla kruhový tvar o průměru 80 mm. Po upnutí do zkušebního zařízení měla testovaná plocha průměr 50 mm. Na tělísko byl bílým sprejem nastříkán skvrnitý vzor a uprostřed byla nakreslená čára, na kterou byly nastaveny v PC 3 body pro výpočet (Obr. 18).



Obrázek 18 – Zkušební tělísko pro zkoušku dvousé napjatosti

4.4.3 Postup a podmínky měření

1. Nejprve byla nastříhána zkušební tělíska, z každé směsi 3 kusy.
2. Zkušební tělíska byla postříkána bílým sprejem a uprostřed byla nakreslena čára.
3. Tělíska byla upnuta do zkušebního stroje.
4. Byly nastaveny, zkalibrovány a zaostřeny kamery snímající celý průběh zkoušky.
5. V PC v software Mercury RT byla nastavena měřící metoda, která byla následně spuštěna. Na zkušebním tělísku byly nastaveny 3 body, které vytvořily trojúhelník (Obr. 19) a pomocí těchto bodů byl zjišťován poloměr r kružnice opsané a délka oblouku l kružnice opsané.
6. Postupně byl přidáván tlak a zkušební tělíska byla nafukována až do poměrného prodloužení 30 % a následně pomalu vyfukována. Tento proces byl u každého vzorku ještě opakován vždy 2x.



Obrázek 19 – Měřící metoda: 3 body tvořící trojúhelník v Mercury RT

4.4.4 Zpracování výsledků

Dle teoretické části (kap. 3.2.3) proběhlo zpracování výsledků. Do software Mercury RT byly přidány potřebné vzorce pro výpočet napětí a poměrného prodloužení. Z naměřených a vypočtených hodnot poměrného prodloužení a napětí byly zpracovány grafy a tabulky (kap 5).

5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

5.1 Směs B1

Kaučuk SBR, 103 dsk Sazí

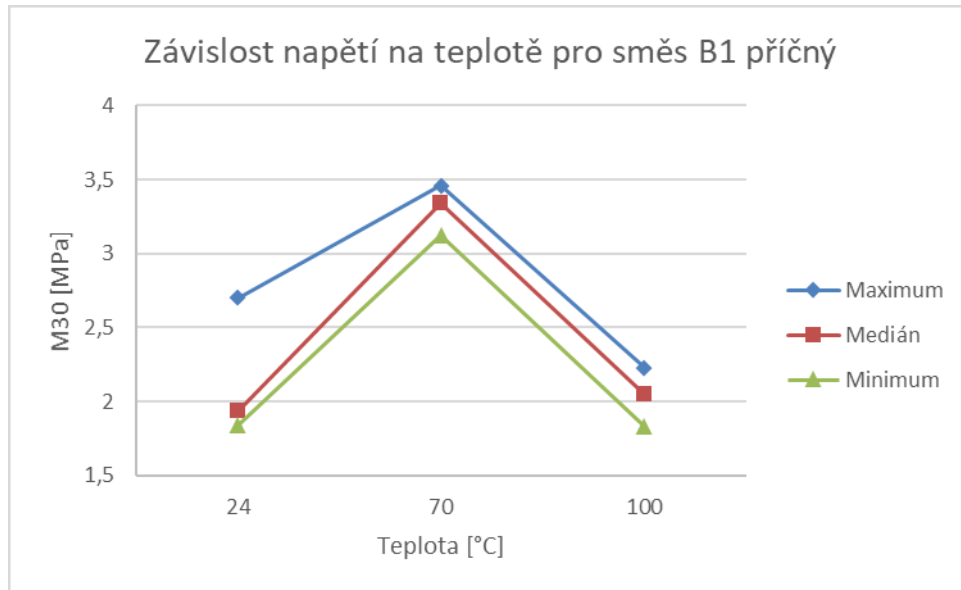
5.1.1 Tah

Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %

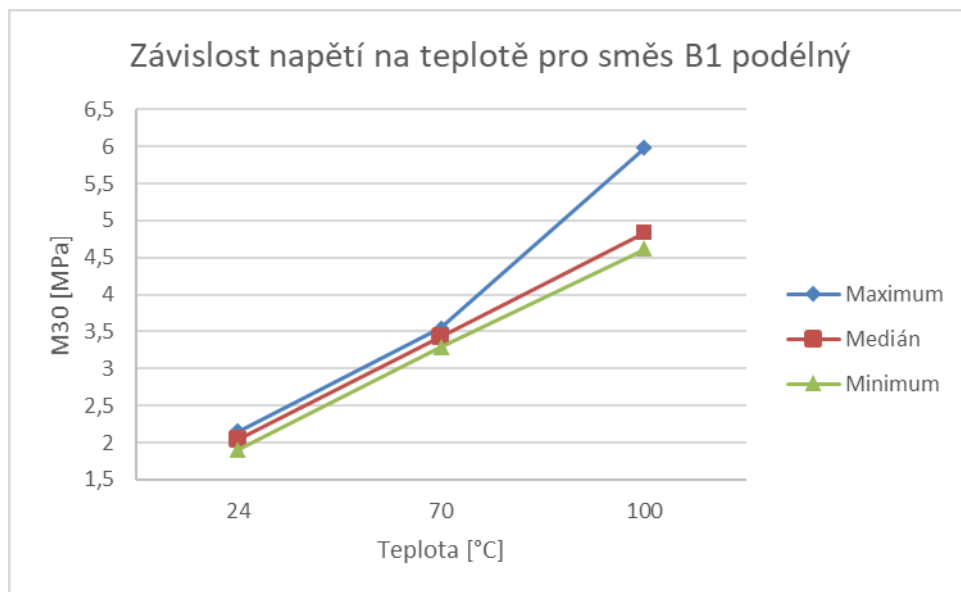
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	2,70	1,84	1,94
B1 podélný	2,15	1,90	2,04
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	3,46	3,12	3,34
B1 podélný	3,55	3,29	3,43
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	2,23	1,83	2,05
B1 podélný	5,98	4,61	4,84

Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B1 při poměrném prodloužení 60 %

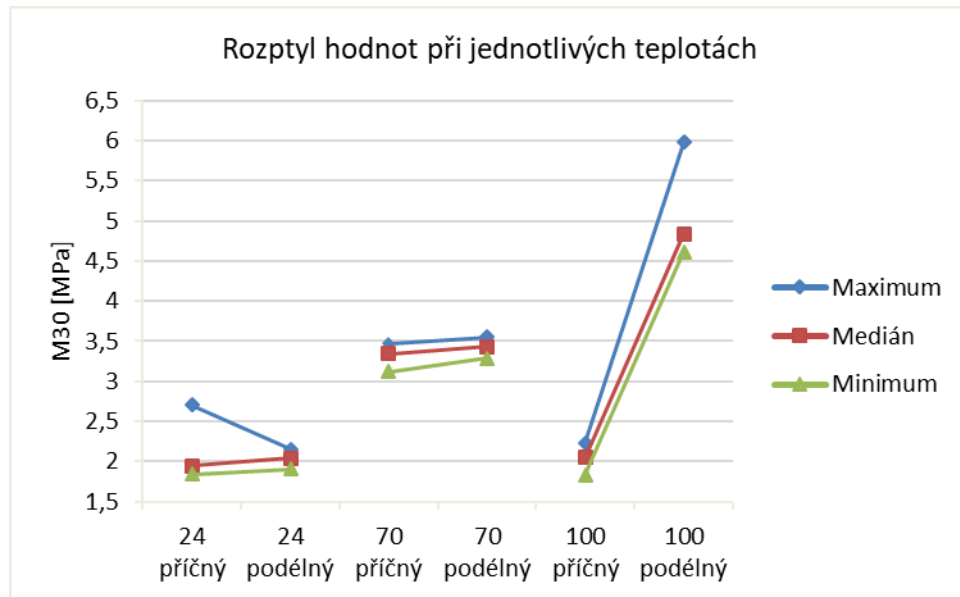
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	5,45	4,46	4,89
B1 podélný	5,27	4,97	5,17
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	6,02	5,28	5,56
B1 podélný	6,35	5,92	6,05
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	4,09	3,37	3,97
B1 podélný	8,30	7,05	7,33



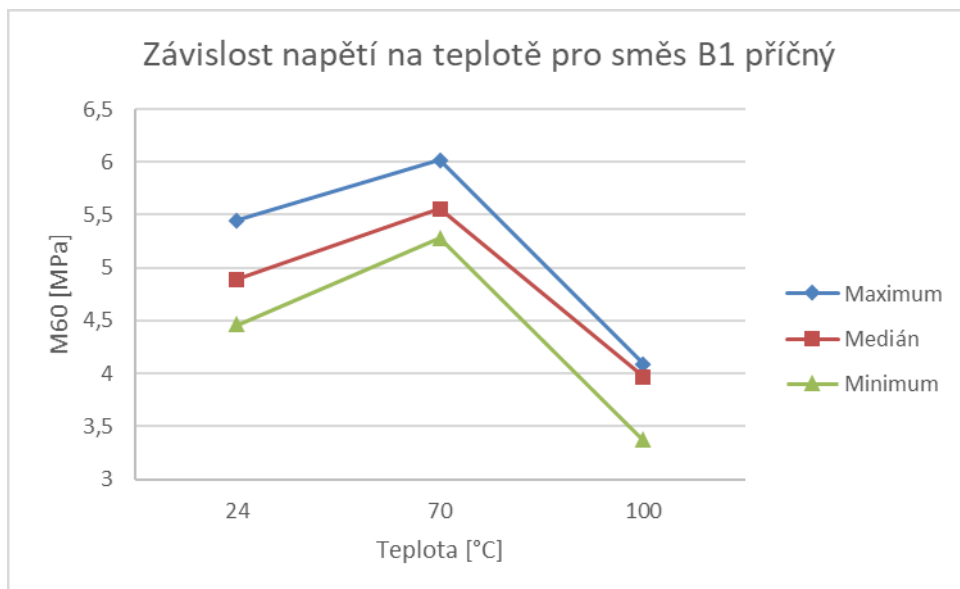
Obrázek 20 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %



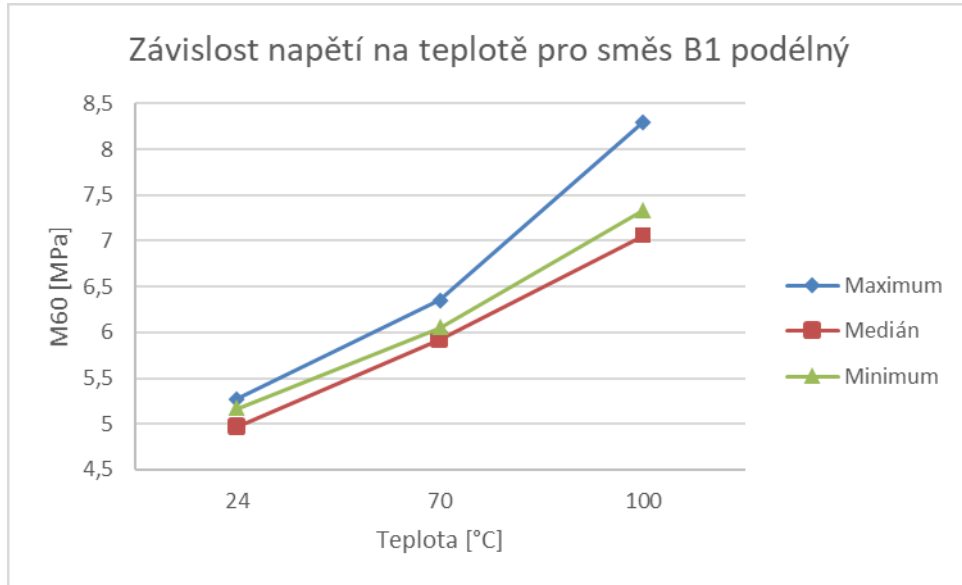
Obrázek 21 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %



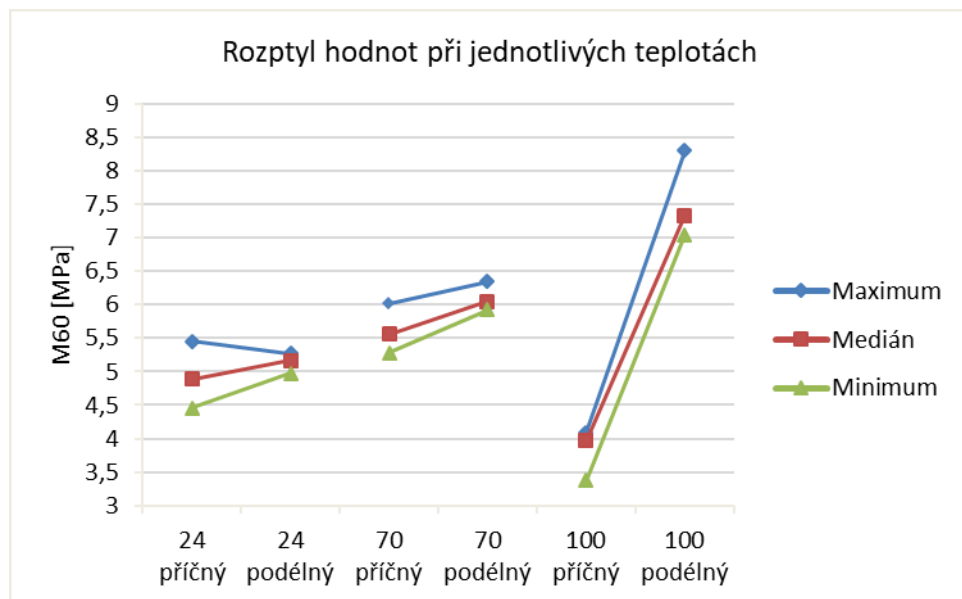
Obrázek 22 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %



Obrázek 23 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 24 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 25 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B1 při poměrném prodloužení 60 %

5.1.2 Čistý smyk

Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %

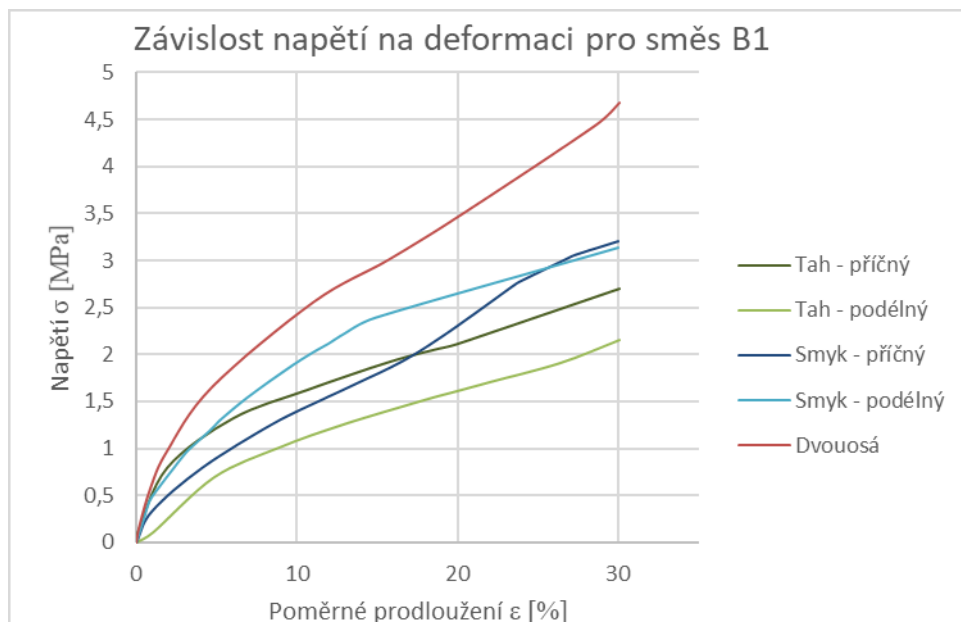
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1 příčný	3,16	2,26	3,08
B1 podélný	3,13	2,72	3,11

5.1.3 Dvousá napjatost

Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B1	4,68	4,46	4,54

5.1.4 Provedené zkoušky



Obrázek 26 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B1 pro všechny provedené zkoušky

5.2 Směs B2

Kaučuk NR+SBR, 74 dsk Sazí

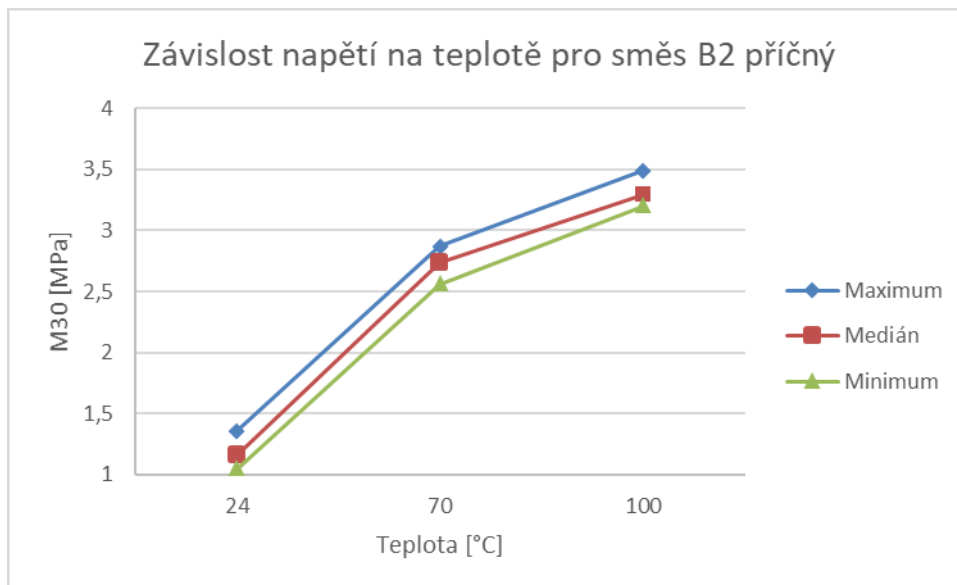
5.2.1 Tah

Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %

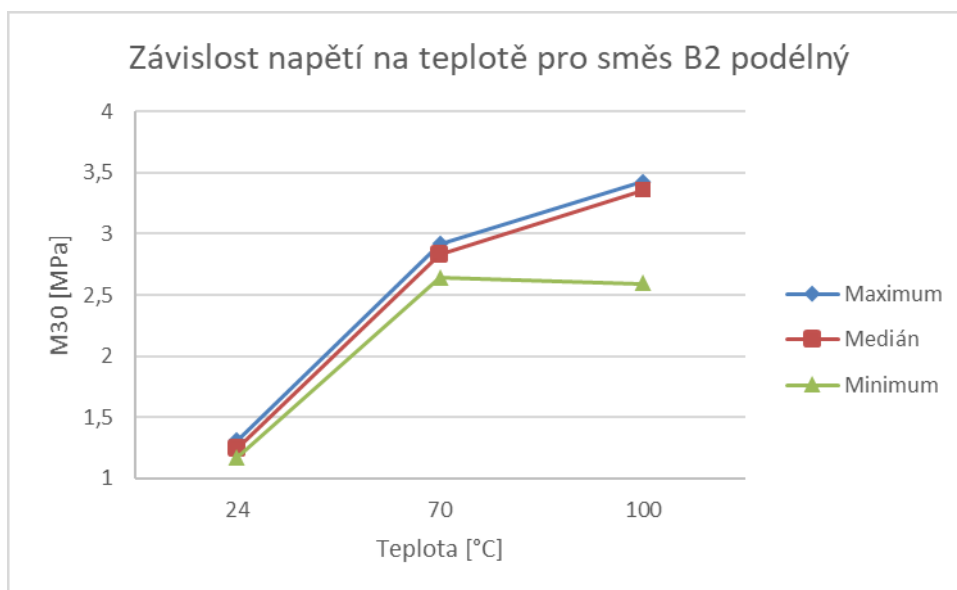
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	1,36	1,05	1,16
B2 podélný	1,31	1,17	1,25
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	2,87	2,56	2,74
B2 podélný	2,92	2,64	2,83
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	3,49	3,2	3,29
B2 podélný	3,43	2,59	3,36

Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B2 při poměrném prodloužení 60 %

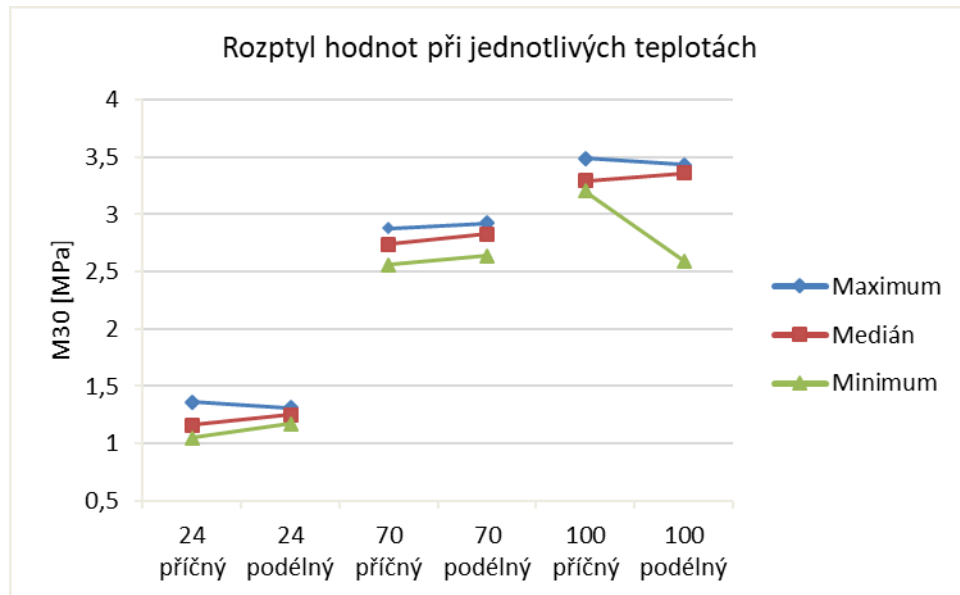
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	2,32	1,9	2,08
B2 podélný	2,23	2,13	2,17
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	3,85	3,39	3,48
B2 podélný	3,92	3,56	3,8
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	4,22	4,02	4,03
B2 podélný	4,37	3,43	4,26



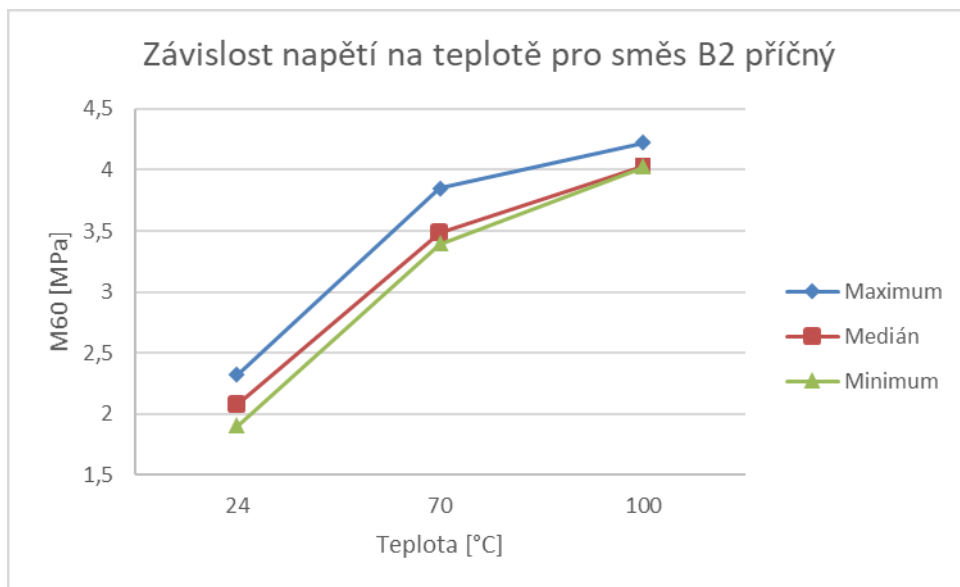
Obrázek 27 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B2 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %



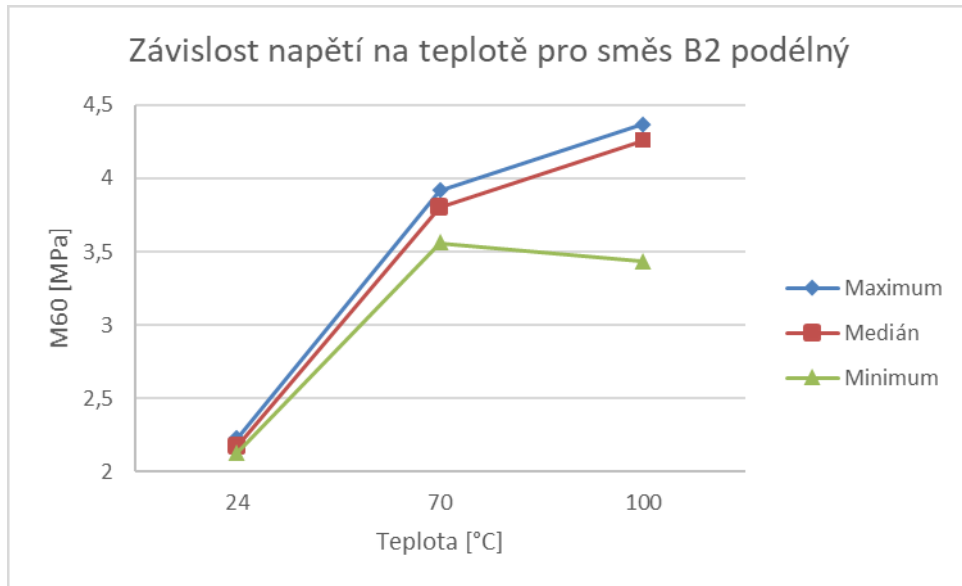
Obrázek 28 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %



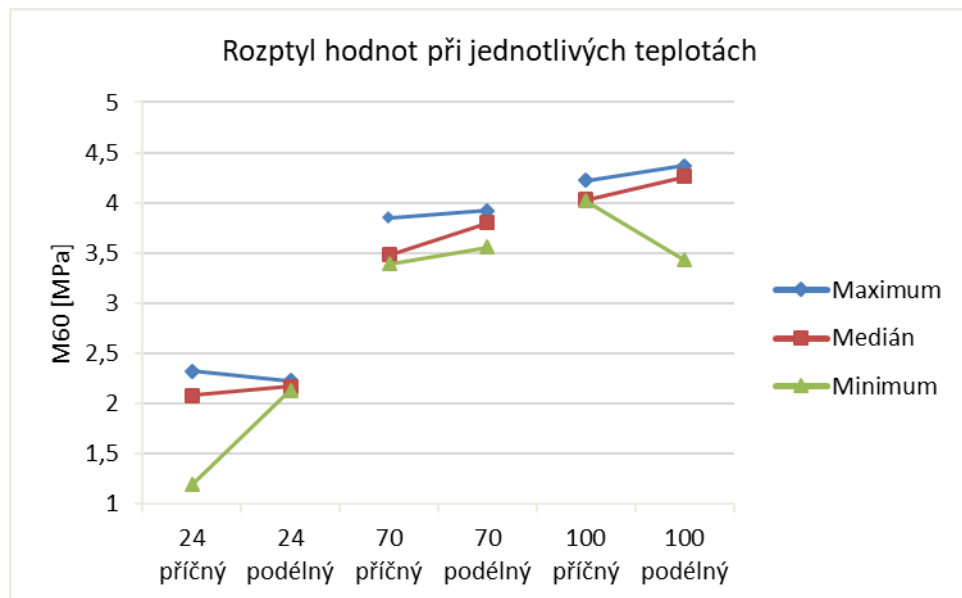
Obrázek 29 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %



Obrázek 30 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B2 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 31 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B2 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 32 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B2 při poměrném prodloužení 60 %

5.2.2 Čistý smyk

Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %

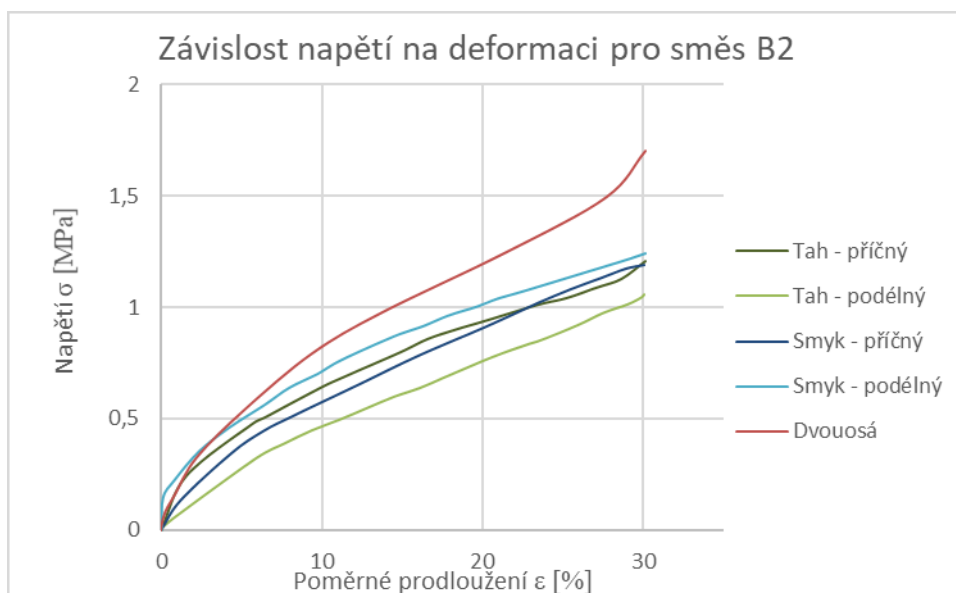
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2 příčný	1,20	1,17	1,18
B2 podélný	1,26	1,08	1,16

5.2.3 Dvouosá napjatost

Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B2	1,70	1,16	1,63

5.2.4 Provedené zkoušky



Obrázek 33 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B2 pro všechny provedené zkoušky

5.3 Směs B3

Kaučuk NR, 25 disk Sazí

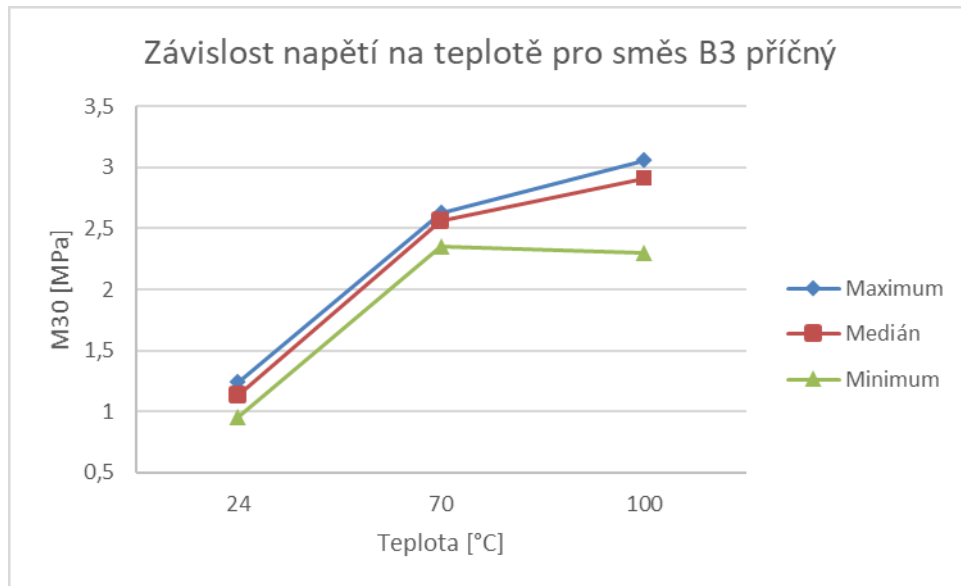
5.3.1 Tah

Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %

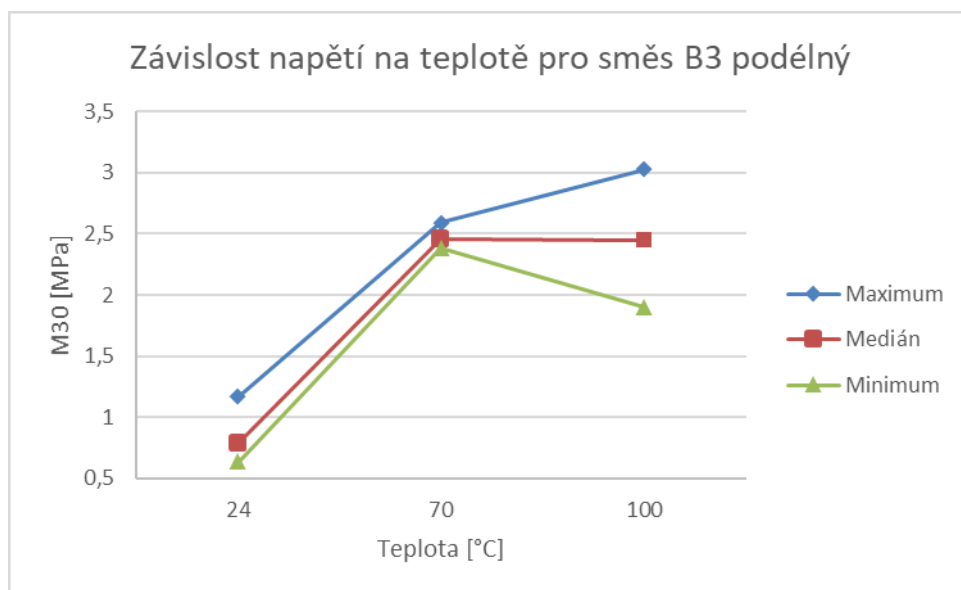
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	1,24	0,95	1,13
B3 podélný	1,17	0,63	0,79
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	2,63	2,35	2,56
B3 podélný	2,59	2,38	2,46
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	3,06	2,3	2,91
B3 podélný	3,03	1,9	2,45

Tabulka 14: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B3 při poměrném prodloužení 60 %

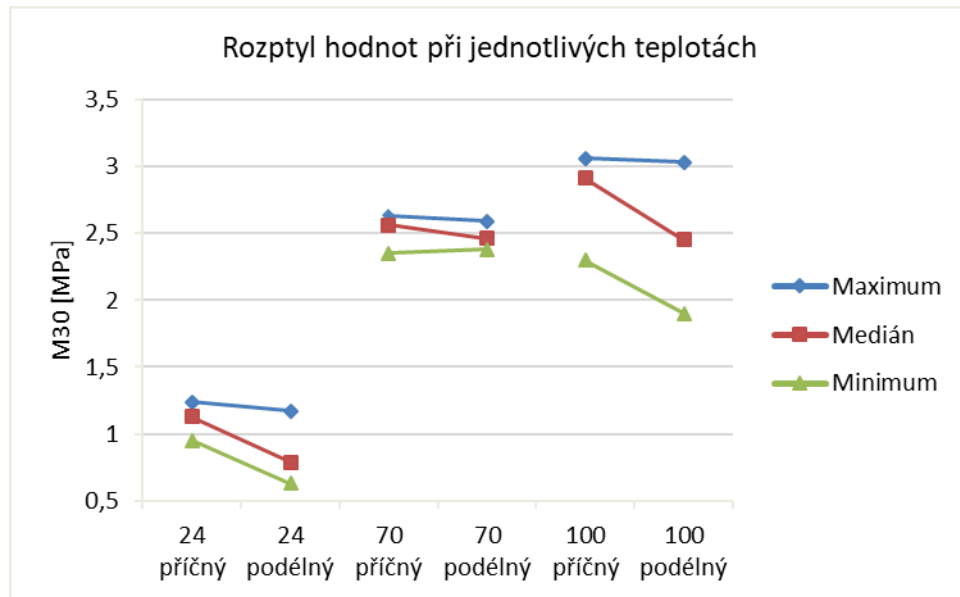
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	1,82	1,59	1,74
B3 podélný	1,8	1,08	1,21
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	3,16	2,91	3,09
B3 podélný	3,08	2,94	3
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	3,59	2,84	3,46
B3 podélný	3,57	2,43	2,93



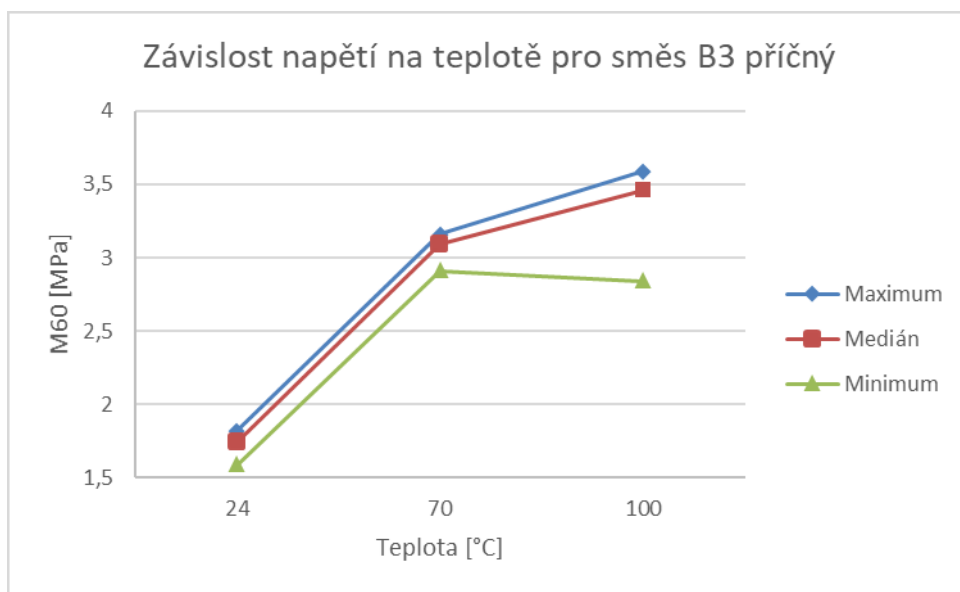
Obrázek 34– Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %



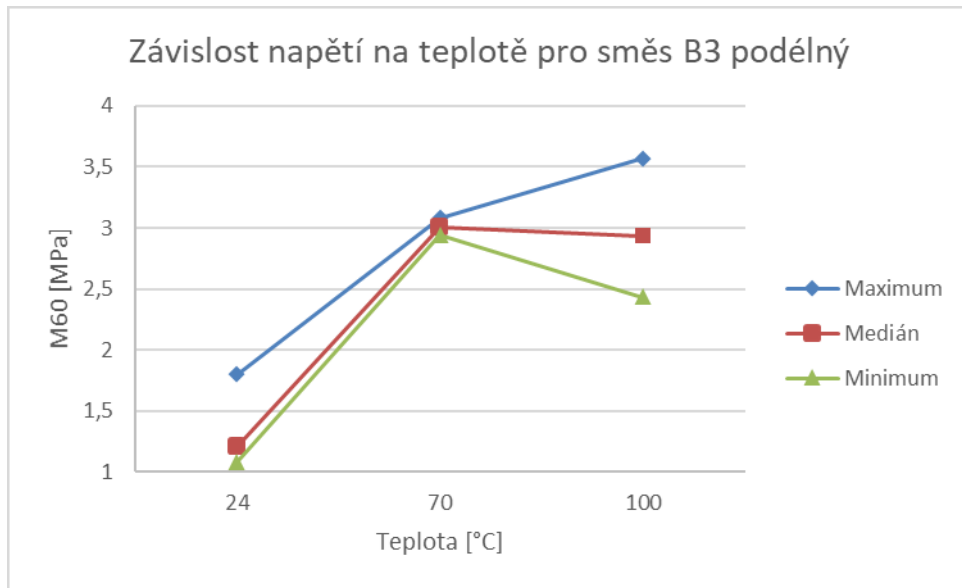
Obrázek 35 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %



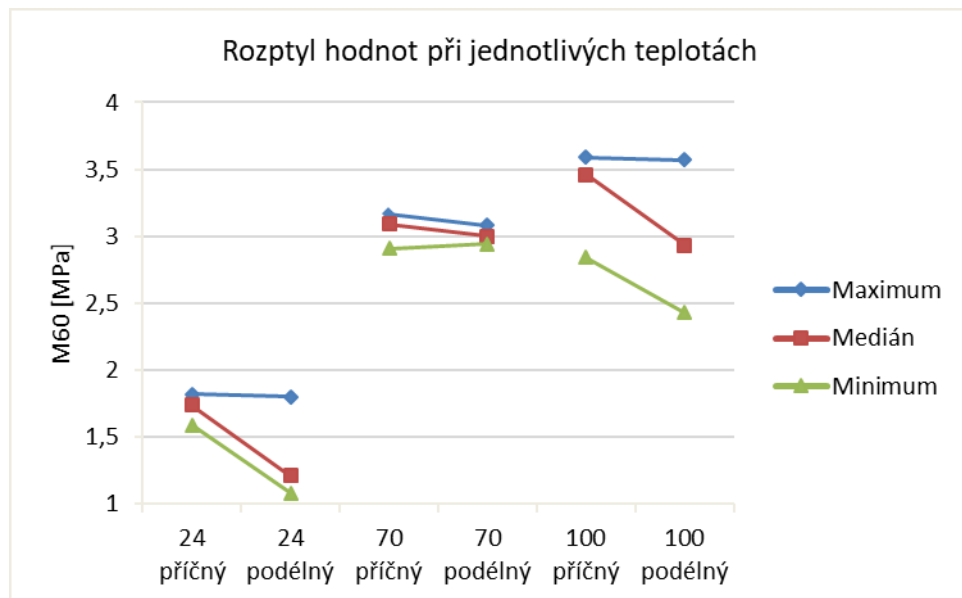
Obrázek 36 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %



Obrázek 37 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 38 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 39 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B3 při poměrném prodloužení 60 %

5.3.2 Čistý smyk

Tabulka 15: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %

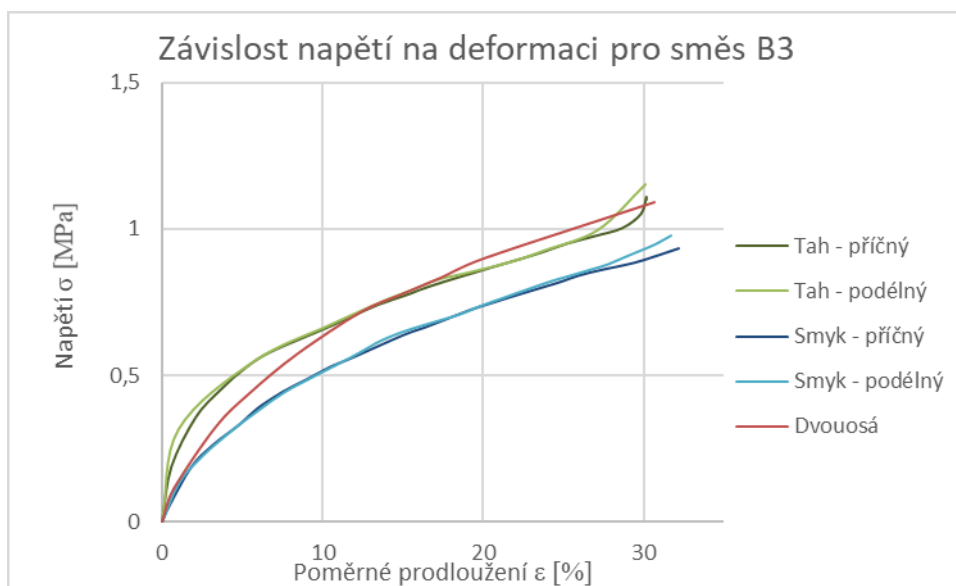
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3 příčný	0,99	0,87	0,97
B3 podélný	0,98	0,94	0,96

5.3.3 Dvousá napjatost

Tabulka 16: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B3	1,09	0,86	0,93

5.3.4 Provedené zkoušky



Obrázek 40 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B3 pro všechny provedené zkoušky

5.4 Směs B4

Kaučuk NR (IR), 50 dsk Sazí

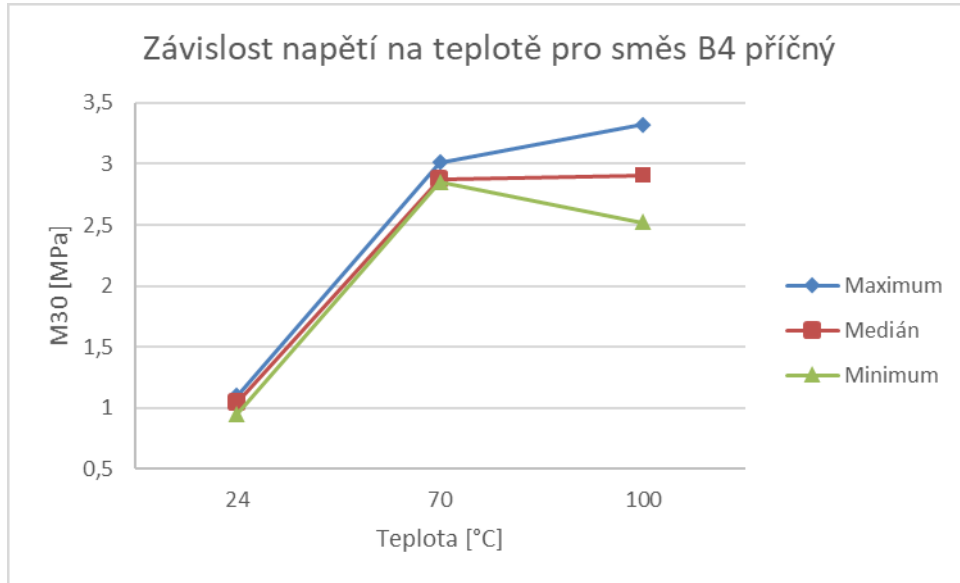
5.4.1 Tah

Tabulka 17: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %

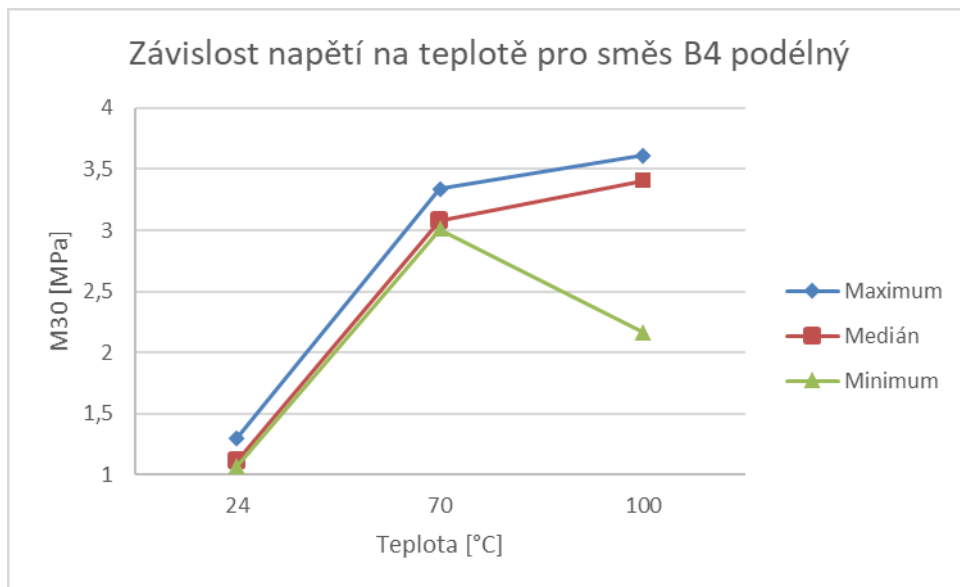
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	1,10	0,95	1,04
B4 podélný	1,30	1,07	1,11
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	3,01	2,85	2,87
B4 podélný	3,34	3,01	3,08
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	3,32	2,52	2,9
B4 podélný	3,61	2,16	3,4

Tabulka 18: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B4 při poměrném prodloužení 60 %

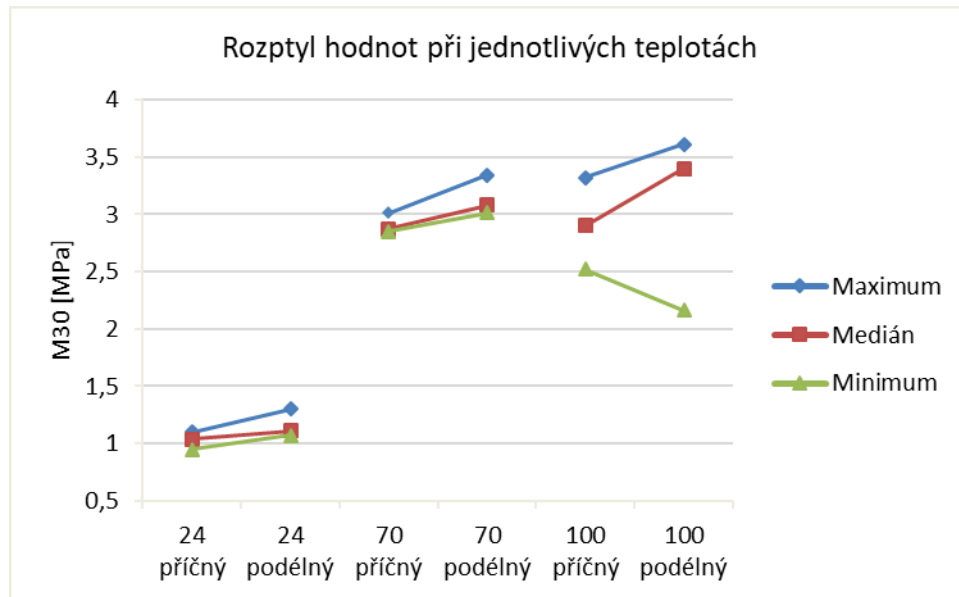
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	2,04	1,76	1,81
B4 podélný	2,09	1,80	1,98
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	4,11	3,68	3,79
B4 podélný	4,40	4,05	4,12
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	4,27	3,41	3,86
B4 podélný	4,74	3,06	4,43



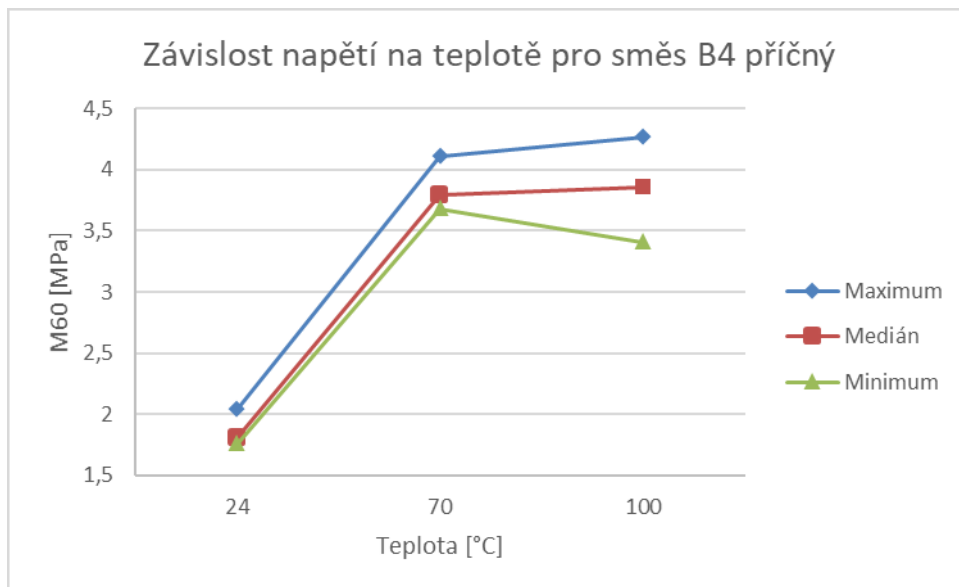
Obrázek 41 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %



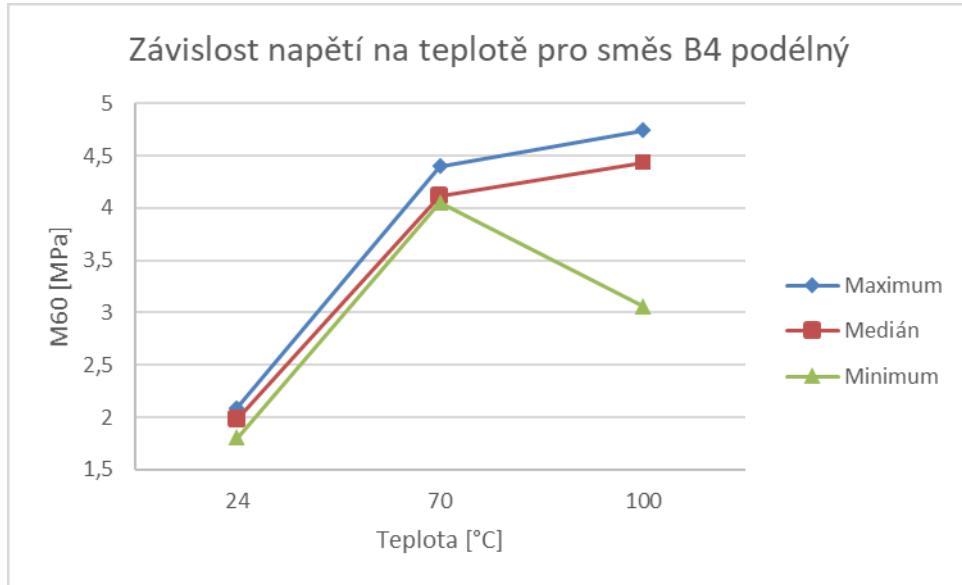
Obrázek 42 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %



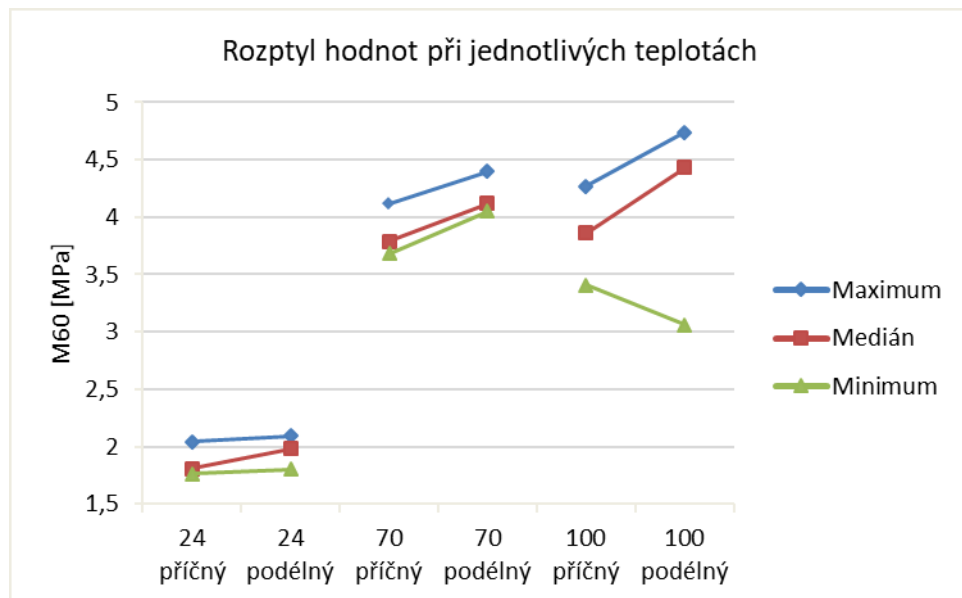
Obrázek 43 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %



Obrázek 44 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 45 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 46– Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B4 při poměrném prodloužení 60 %

5.4.2 Čistý smyk

Tabulka 19: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %

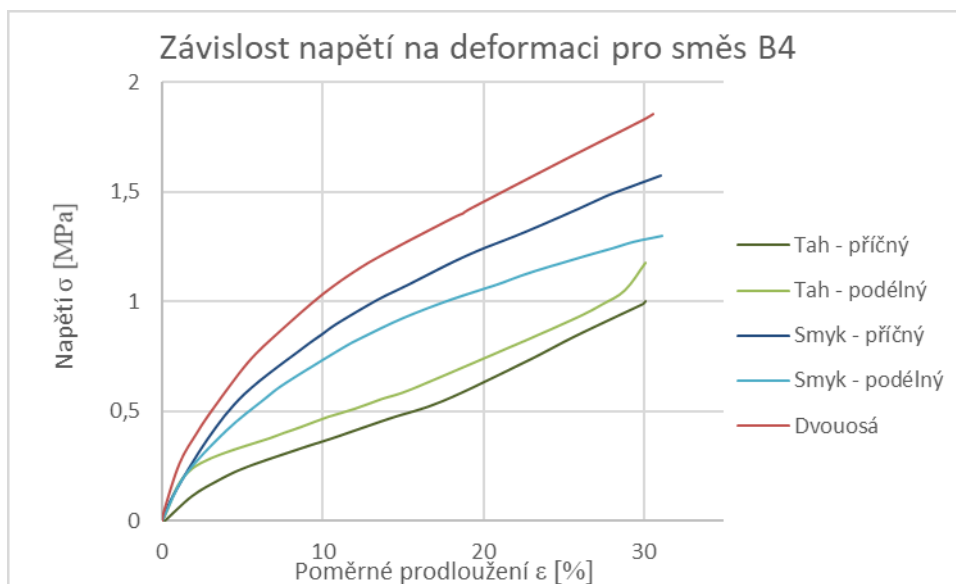
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4 příčný	1,66	1,34	1,64
B4 podélný	1,60	1,31	1,56

5.4.3 Dvouosá napjatost

Tabulka 20: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B4	1,98	1,65	1,73

5.4.4 Provedené zkoušky



Obrázek 47 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B4 pro všechny provedené zkoušky

5.5 Směs B5

Kaučuk EPDM, 34 dsk Sazí

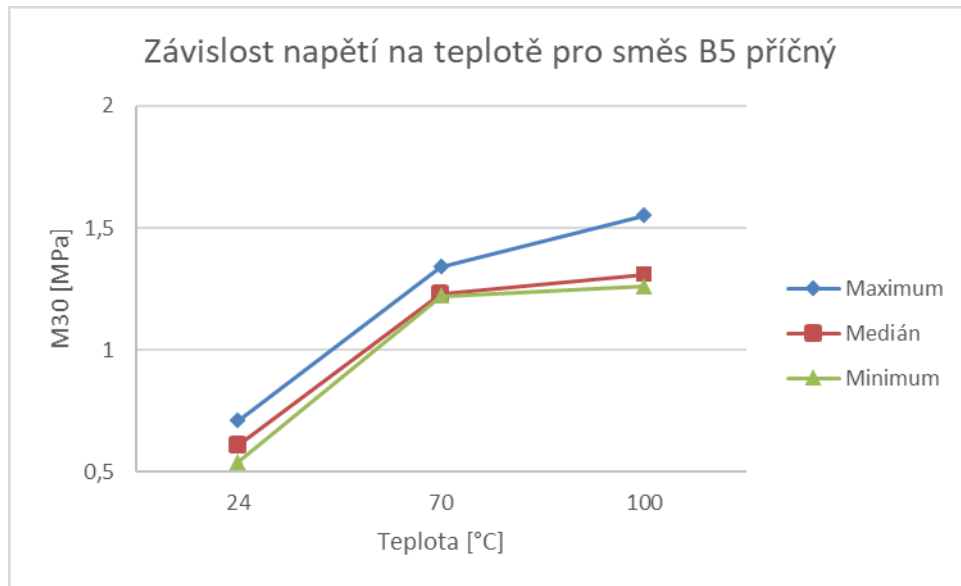
5.5.1 Tah

Tabulka 21: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %

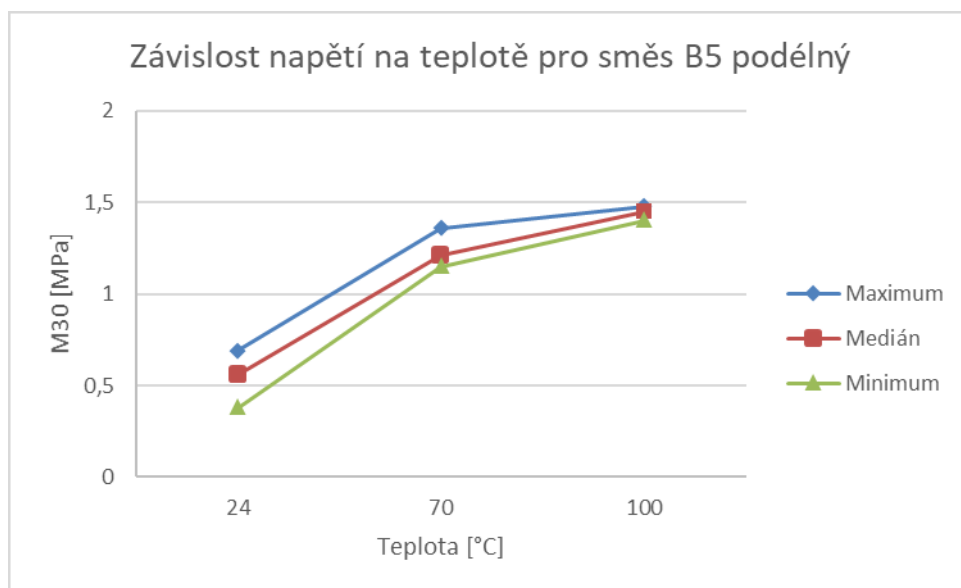
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	0,71	0,54	0,61
B5 podélný	0,69	0,38	0,56
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	1,34	1,22	1,23
B5 podélný	1,36	1,15	1,21
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	1,55	1,26	1,31
B5 podélný	1,48	1,40	1,45

Tabulka 22: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B5 při poměrném prodloužení 60 %

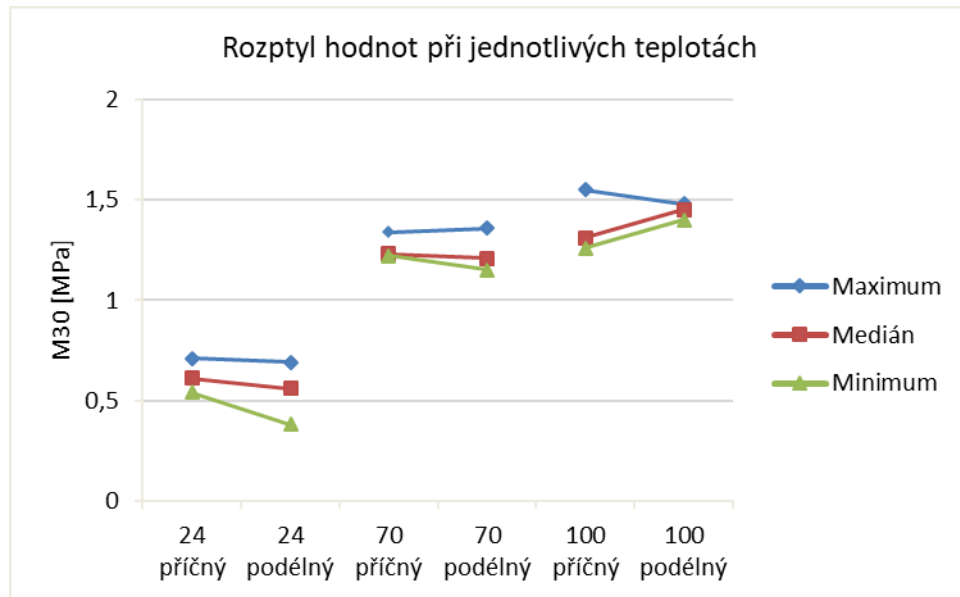
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	0,73	0,66	0,69
B5 podélný	0,70	0,49	0,65
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	1,59	1,53	1,58
B5 podélný	1,64	1,46	1,47
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	1,83	1,54	1,58
B5 podélný	1,72	1,65	1,71



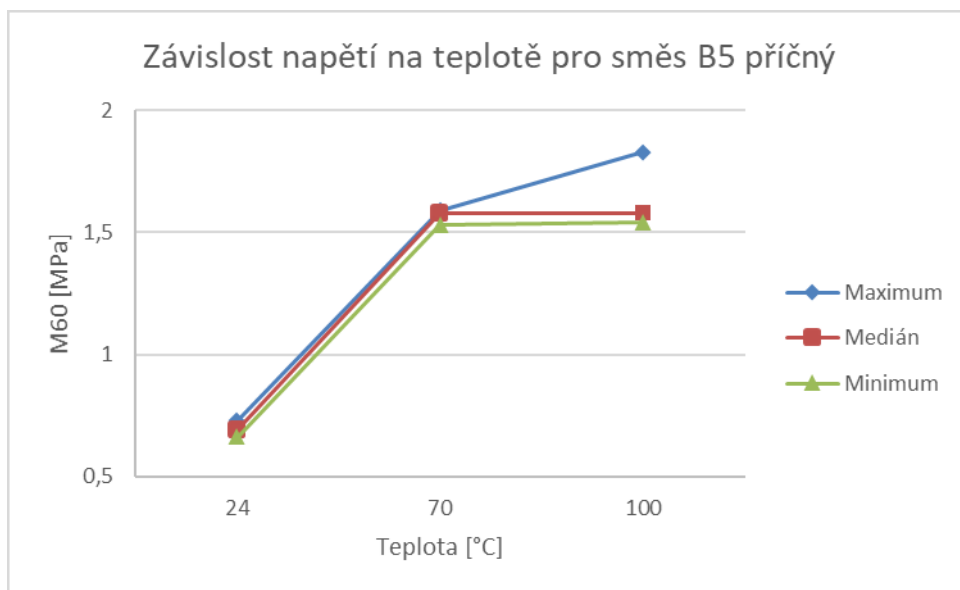
Obrázek 48 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %



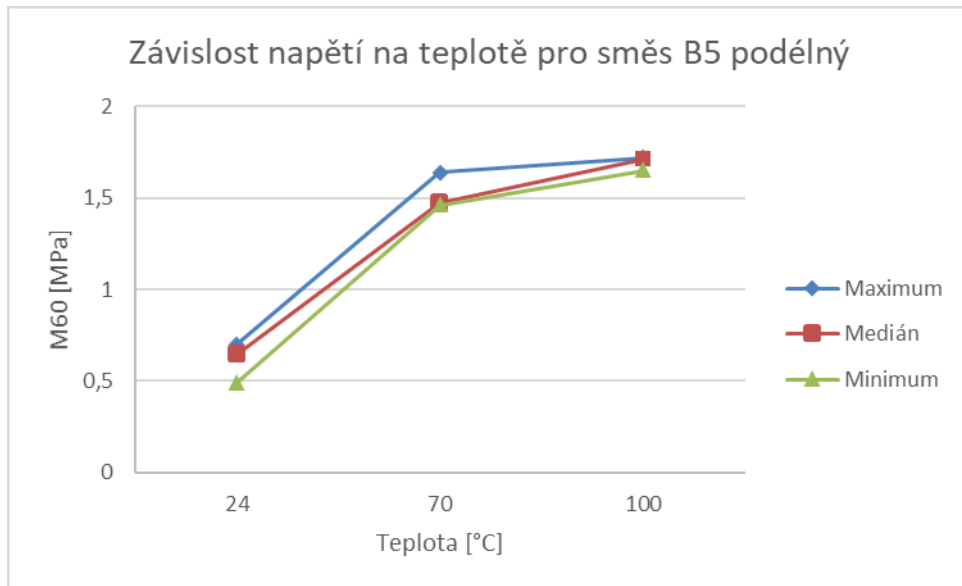
Obrázek 49 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %



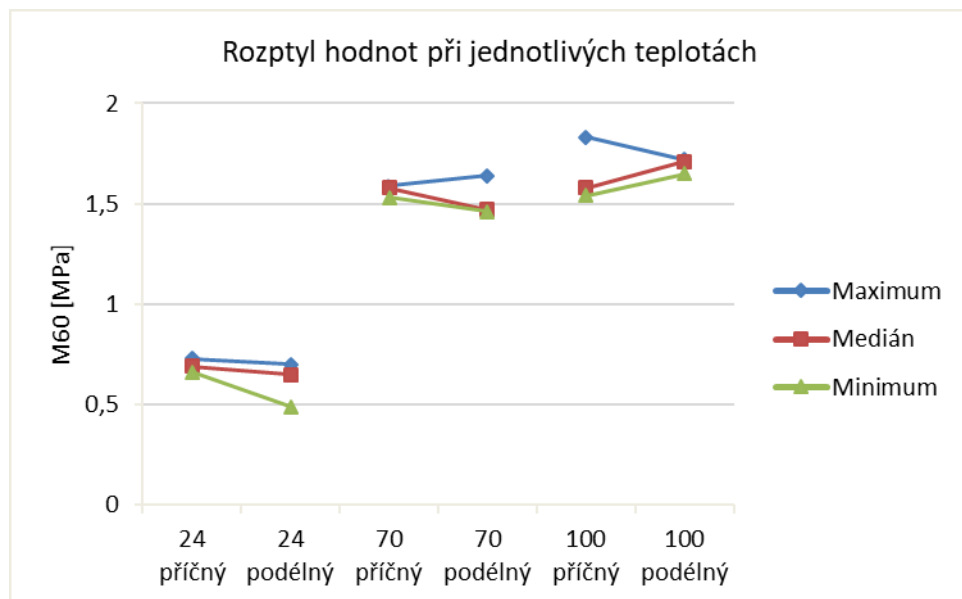
Obrázek 50– Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %



Obrázek 51 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 52 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 53 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B5 při poměrném prodloužení 60 %

5.5.2 Čistý smyk

Tabulka 23: Tabulka 24: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %

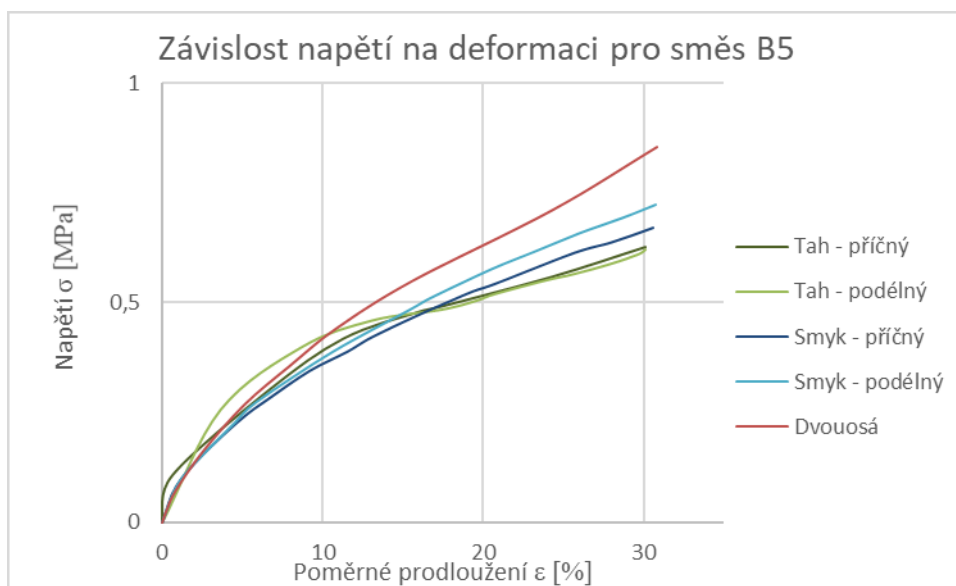
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5 příčný	0,79	0,60	0,74
B5 podélný	0,80	0,61	0,75

5.5.3 Dvouosá napjatost

Tabulka 25: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B5	0,86	0,80	0,84

5.5.4 Provedené zkoušky



Obrázek 54 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B5 pro všechny provedené zkoušky

5.6 Směs B6

Kaučuk EPDM, 40 dsk Sazí

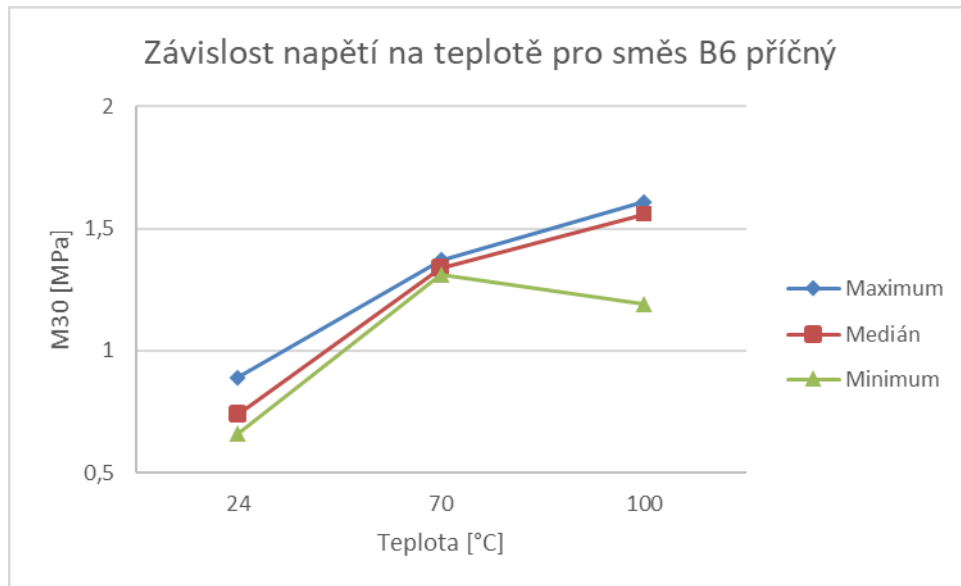
5.6.1 Tah

Tabulka 26: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %

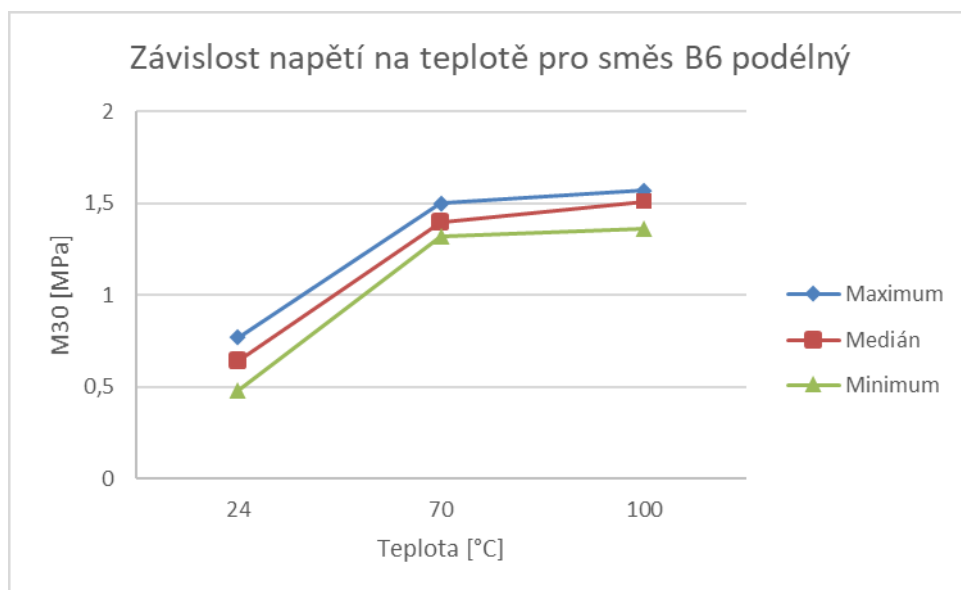
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	0,89	0,66	0,74
B6 podélný	0,77	0,48	0,64
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	1,37	1,31	1,34
B6 podélný	1,50	1,32	1,40
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	1,61	1,19	1,56
B6 podélný	1,57	1,36	1,51

Tabulka 27: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B6 při poměrném prodloužení 60 %

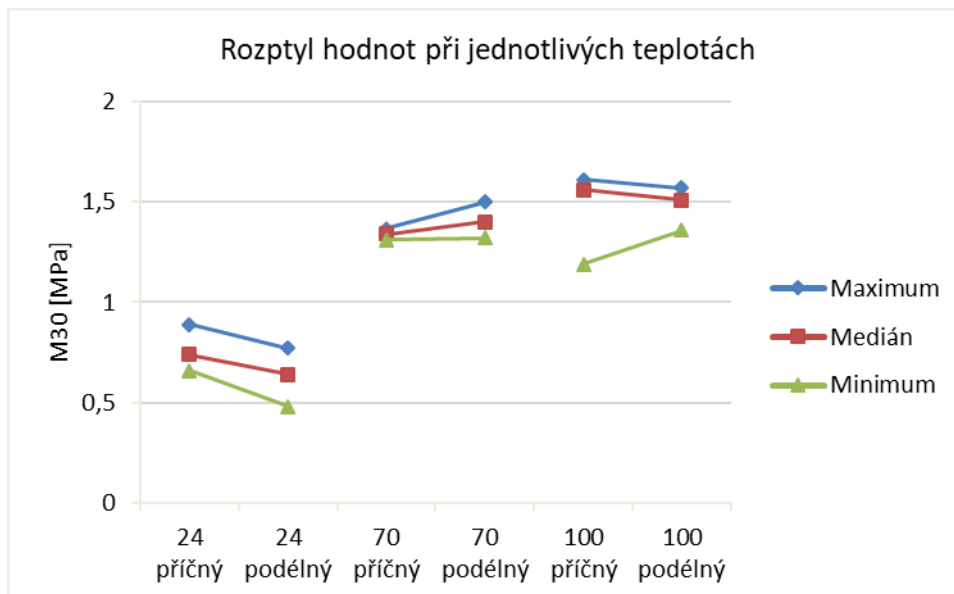
Napětí σ při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	0,90	0,75	0,84
B6 podélný	0,79	0,51	0,68
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	1,75	1,67	1,69
B6 podélný	1,81	1,60	1,74
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	1,93	1,53	1,87
B6 podélný	1,90	1,68	1,81



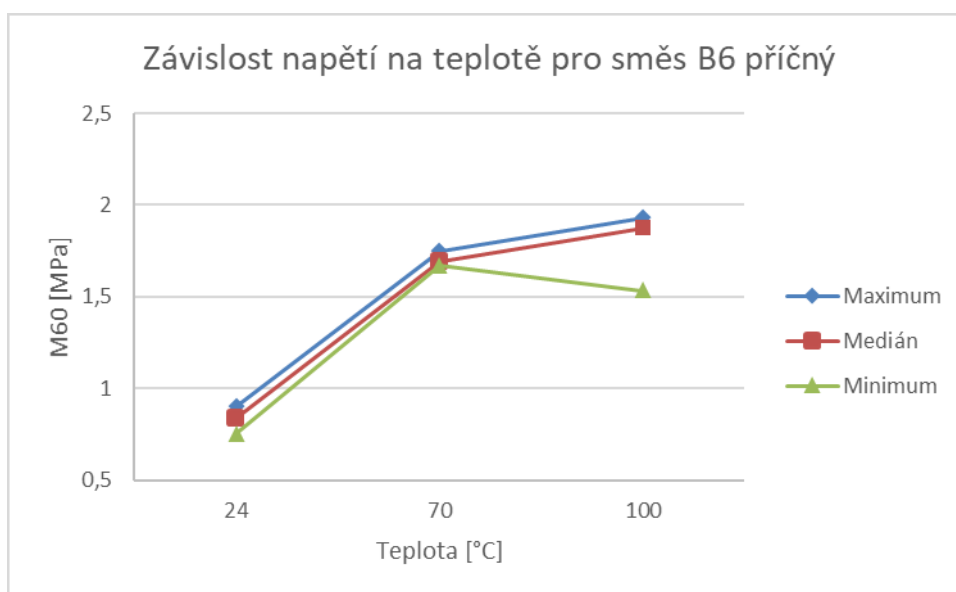
Obrázek 55 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %



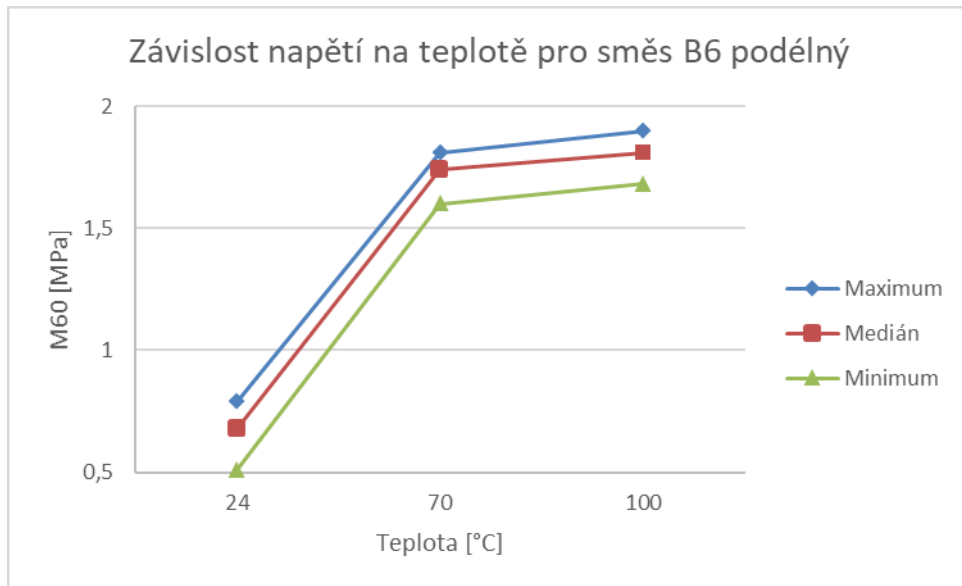
Obrázek 56 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %



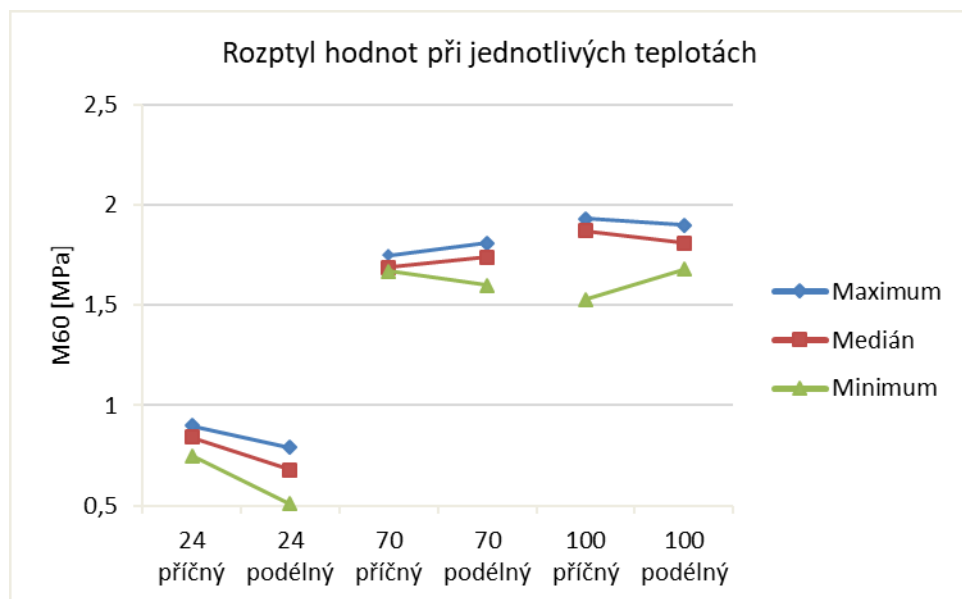
Obrázek 57 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %



Obrázek 58 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 59– Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %



Obrázek 60 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B6 při poměrném prodloužení 60 %

5.6.2 Čistý smyk

Tabulka 28: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %

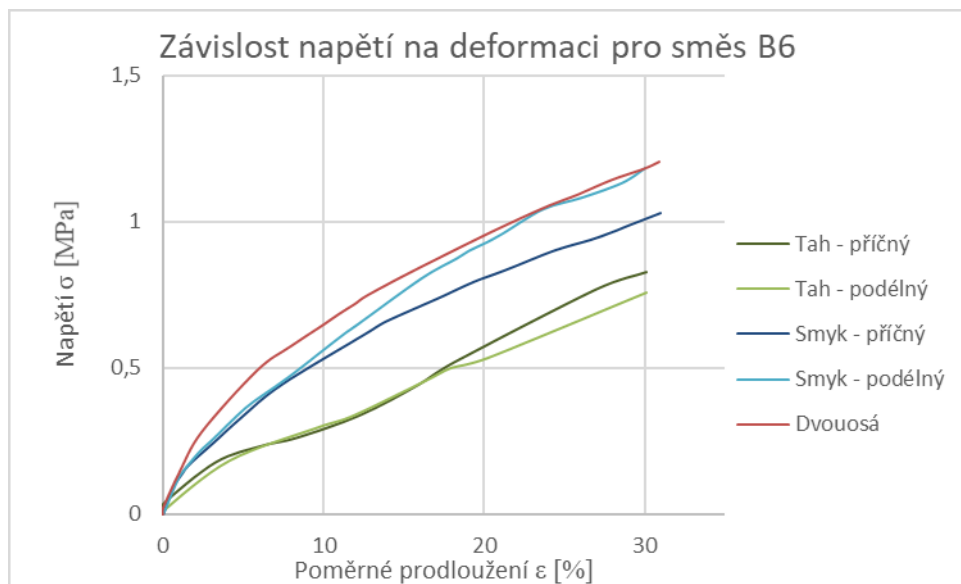
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6 příčný	1,12	0,90	1,11
B6 podélný	1,24	0,88	1,02

5.6.3 Dvuousá napjatost

Tabulka 29: Naměřené hodnoty napětí ve dvuousé napjatosti pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %

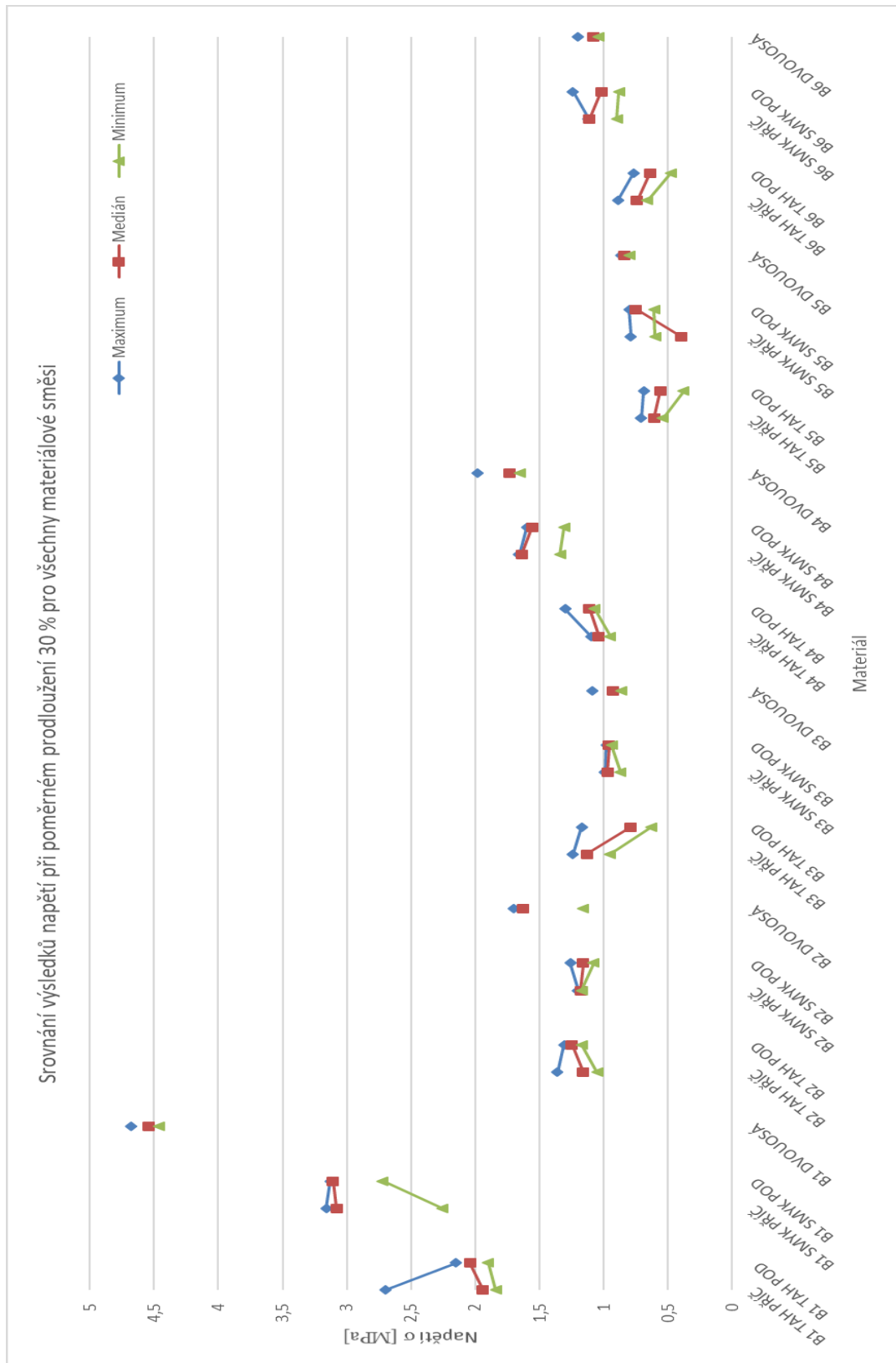
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
B6	1,20	1,04	1,08

5.6.4 Provedené zkoušky



Obrázek 61 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B6 pro všechny provedené zkoušky

5.7 Srovnání naměřených hodnot všech materiálových směsí



Obrázek 62 – Srovnání napětí pro všechny materiálové směsi při poměrném prodloužení 30 % a zkoušky jednoosým tahem, čistým smykem a dvouosou napjatostí

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Materiálové směsi byly testovány zkouškami jednoosé napjatosti (tahem), čistým smykem a dvouosé napjatosti. Ve výsledných grafech lze vidět, že na výsledné hodnoty má vliv nejenom směr válcování, ale také složení směsí a obsah kaučuku. Proto u každé směsi byly naměřeny nejvyšší hodnoty napětí u různých zkoušek. Některé směsi měly vyšší hodnoty v tahu, jiné ve smyku, nebo dvouosé napjatosti.

Pro směs B1 při zkoušce tahem pro 24 °C byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % v příčném směru válcování 1,94 MPa a v podélném směru válcování 2,04 MPa. Pro teplotu 70 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 3,34 MPa a v podélném směru 3,43 MPa. Pro teplotu 100 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 2,05 MPa a v podélném směru 4,84 MPa. V čistém smyku byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % pro příčný směr válcování 3,08 MPa a pro podélný směr válcování 3,11 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla získána hodnota napětí mediánu při poměrném prodloužení 30 % 2,98 MPa.

Pro směs B2 při zkoušce tahem pro 24 °C byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % v příčném směru válcování 1,16 MPa a v podélném směru válcování 1,25 MPa. Pro teplotu 70 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 2,74 MPa a v podélném směru 2,83 MPa. Pro teplotu 100 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 3,29 MPa a v podélném směru 3,36 MPa. V čistém smyku byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % pro příčný směr válcování 1,18 MPa a pro podélný směr válcování 1,16 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % 1,63 MPa.

Pro směs B3 při zkoušce tahem pro 24 °C byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % v příčném směru válcování 1,13 MPa a v podélném směru válcování 0,79 MPa. Pro teplotu 70 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 2,56 MPa a v podélném směru 2,46 MPa. Pro teplotu 100 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 2,91 MPa a v podélném směru 2,45 MPa. V čistém smyku byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % pro příčný směr válcování 0,97 MPa a pro podélný směr válcování 0,96 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % 0,93 MPa.

Pro směs B4 při zkoušce tahem pro 24 °C byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % v příčném směru válcování 1,04 MPa a v podélném směru válcování

1,11 MPa. Pro teplotu 70 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 2,87 MPa a v podélném směru 3,08 MPa. Pro teplotu 100 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 2,90 MPa a podélném směru 3,40 MPa. V čistém smyku byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % pro příčný směr válcování 1,64 MPa a pro podélný směr válcování 1,56 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % 1,73 MPa.

Pro směs B5 při zkoušce tahem pro 24 °C byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % v příčném směru válcování 0,61 MPa a v podélném směru válcování 0,56 MPa. Pro teplotu 70 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 1,23 MPa a v podélném směru 1,21 MPa. Pro teplotu 100 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 1,31 MPa a podélném směru 1,45 MPa. V čistém smyku byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % pro příčný směr válcování 0,74 MPa a pro podélný směr válcování 0,75 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % 0,84 MPa.

Pro směs B6 při zkoušce tahem pro 24 °C byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % v příčném směru válcování 0,74 MPa a v podélném směru válcování 0,64 MPa. Pro teplotu 70 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 1,34 MPa a v podélném směru 1,40 MPa. Pro teplotu 100 °C byla hodnota mediánu v příčném směru 1,56 MPa a podélném směru 1,51 MPa. V čistém smyku byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % pro příčný směr válcování 1,11 MPa a pro podélný směr válcování 1,02 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla získána hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 30 % 1,08 MPa.

Směs B1 a B2 vykazovala vyšší hodnoty napětí v tahu při teplotách 100 °C. Také směs B1 vyšla jako nejtuzší ze šesti zkoušených směsí. Velmi podobné hodnoty napětí pro příčný a podélný směr měla směs B3. Směsi B5 a B6 vykazovaly vyšší hodnoty deformace při nižším napětí.

Při jednoosém tahu se s teplotou výrazně zvyšovala hodnota napětí. U většiny materiálových směsí vidíme značné změny v rozmezí teplot 24 °C až 70 °C. Závislost napětí na poměrném prodloužení 30 % při teplotě 24 °C ze zkoušky dvouosé napjatosti je u všech zkoušených směsích nejvyšší.

ZÁVĚR

Teoretická část této bakalářské práce se věnuje přehledu v oblasti elastomerních materiálů, a to z hlediska výrobních surovin, přísad gumárenských směsí a výpočetních modelů aplikovaných pro zkoušení elastomerů.

Cílem praktické části bylo stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů. Jednalo se o 6 různých směsí, které byly testovány mechanicky zkouškou jednoosé napjatosti, čistým smykem a dvouosé napjatosti. Zkoušky byly prováděny při různých teplotách a pro různé směry válcování (příčný a podélný směr).

Testování bylo prováděno v univerzitních laboratořích za laboratorních podmínek. Zkouška jednoosé napjatosti (tah) probíhala při teplotách 24 °C, 70 °C a 100 °C. Cyklus testování probíhal u jednoho vzorku 4x, nejprve bylo zkušební tělísko protahováno do 60 % poměrného prodloužení a poté 3x do 30 % poměrného prodloužení. U zkoušky čistým smykem byly elastomery natahovány do 30 % poměrného prodloužení při teplotě 24 °C. Zkouška dvouosé napjatosti měla 3 cykly testování, kdy bylo tělísko protahováno do 30 % poměrného prodloužení, a to také při teplotě 24 °C.

Ze všech provedených zkoušek byla zjišťována závislost napětí na poměrném prodloužení a u tahu i závislost napětí na teplotě. Všechny zjištěné hodnoty byly zaneseny do tabulek a grafů a podrobné zhodnocení výsledků bylo provedeno v kapitole 6.

Z vyhodnocených výsledků se nedá jednoznačně říci, zda se hodnoty napětí liší při podélném, či příčném směru válcování. U některých materiálových směsí hodnoty vykazovaly jistou podobnost pro oba směry.

Hodnota napětí při 30 % poměrného prodloužení jednoznačně roste do teploty 70 °C. Pro většinu materiálových směsí mezi teplotami 70 °C a 100 °C nebyla naměřena výrazná změna napětí. Pro 24 °C jsou materiálové směsi méně tuhé.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Prekop, Š. a kolektiv. *Gumárenská technológia I*, Žilina, 1998, 282 s. ISBN 80-7100-483-9
- [2] Ducháček, V., Hrdlička Z. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*, 4. ed. Praha : VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2
- [3] Maláč, J. *Gumárenská technologie* [online]. [cit. 2019-03-11].
Dostupné z: [https:// www.home.karneval.cz/0323339201/](https://www.home.karneval.cz/0323339201/)
- [4] Ducháček, V. *Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery*, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2006. ISBN 80-02-01784-6
- [5] Ducháček, V. *Změkčovadla*, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2010. ISBN 978-80-02-02287-9
- [6] Gent, A., N. *Engineering with rubber*. Munich: Carl Hauser Verlag, 2001. ISBN 3-446-21403-8
- [7] Dvořák, Z., Javořík, J. *Elastomerní konstrukční materiály*, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2009. ISBN 978-80-02-02155-1
- [8] Javořík, J. *Zkoušení rovnoměrné rovinné napjatosti elastomerů*, UTB ve Zlíně, 2005, [učební text].
- [9] Běhálek, L. *Polymery*, [online]. ISBN 978-80-88058-68-7 Dostupné z: [https://publi.cz/books/180/Cover.html/](https://publi.cz/books/180/Cover.html)
- [10] Dofrmann, Al. *Constitutive Models for Rubber*, Rotterdam: Brookfield, 1999, ISBN 90-5809-113-9
- [11] Racek, J. *elektronický Herbář*, [online]. [cit. 2019-01-11].
Dostupné z: <http://www.e-herbar.net/>
- [12] *Metoda digitalnej obrazovej korelacie* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/434-metoda-digitalnej-obrazovej-korelacie>
- [13] *Measurement principles of DIC* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>

- [14] *Digital Image Correlation* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110702352>
- [15] *Gumárenské směsi* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.rubena.eu/cz/produkty/gumarenske-smesi/>
- [16] 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
- [17] Vašíček, E., Vičánek, M. *Kaučuky* [online]. 2005, [prezentace]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5973919/release/woothce>
- [18] Machač, Luboš. *Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů*. Zlín, 2018. Bakalářská práce. UTB.

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	Fluoruhlíkový kaučuk
G_s	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]
Phr	Parts per hundred rubber
Q	Silikonový kaučuk
QT	Polysulfidový kaučuk
r	Poloměr [m]
RIFT	Rozvoj infrastruktury Fakulty technologické
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]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Rozdělení polymerů.	11
Obrázek 2 – Kaučukovník brazilský [11]	12
Obrázek 3 – Výrobky z kaučuků pro všeobecné použití [9].....	14
Obrázek 4 – Výrobky ze speciálních kaučuků [9].....	16
Obrázek 5 – Přísady gumárenské směsi [15].....	17
Obrázek 6 – Závislost napětí a deformace u elastomerů [8].....	22
Obrázek 7 – Jednoosá napjatost [6]	28
Obrázek 8 – Čistý smyk [6]	30
Obrázek 9 – Upnutí vzorku při smyku.....	30
Obrázek 10 – Dvouosá napjatost [6].....	31
Obrázek 11 – Nafouknutí vzorku [8].....	31
Obrázek 12 – Sestava DIC.....	33
Obrázek 13 – Princip metody [12].....	34
Obrázek 14 – Zkušební tělísko pro zkoušku tahem.....	37
Obrázek 15 – Zkušební tělísko pro zkoušku čistým smykem	39
Obrázek 16 – Upevnění vzorku a nastavení kamer	40
Obrázek 17 – Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti s DIC.....	41
Obrázek 18 – Zkušební tělísko pro zkoušku dvouosé napjatosti.....	41
Obrázek 19 – Měřicí metoda: 3 body tvořící trojúhelník v Mercury RT	42
Obrázek 20 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %.....	44
Obrázek 21 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %	44
Obrázek 22 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %.....	45
Obrázek 23 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %.....	45
Obrázek 24 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %	46
Obrázek 25 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B1 při poměrném prodloužení 60 %.....	46

Obrázek 26 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B1 pro všechny provedené zkoušky	47
Obrázek 27 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B2 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %.....	49
Obrázek 28 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B1 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %	49
Obrázek 29 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %.....	50
Obrázek 30 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B2 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %.....	50
Obrázek 31 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B2 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %	51
Obrázek 32 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B2 při poměrném prodloužení 60 %.....	51
Obrázek 33 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B2 pro všechny provedené zkoušky	52
Obrázek 34– Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %.....	54
Obrázek 35 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %	54
Obrázek 36 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %.....	55
Obrázek 37 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %.....	55
Obrázek 38 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B3 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %	56
Obrázek 39 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B3 při poměrném prodloužení 60 %.....	56
Obrázek 40 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B3 pro všechny provedené zkoušky	57
Obrázek 41 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %.....	59

Obrázek 42 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %	59
Obrázek 43 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %.....	60
Obrázek 44 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %.....	60
Obrázek 45 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B4 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %	61
Obrázek 46– Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B4 při poměrném prodloužení 60 %.....	61
Obrázek 47 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B4 pro všechny provedené zkoušky	62
Obrázek 48 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %.....	64
Obrázek 49 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %	64
Obrázek 50– Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %.....	65
Obrázek 51 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %.....	65
Obrázek 52 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B5 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %	66
Obrázek 53 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B5 při poměrném prodloužení 60 %.....	66
Obrázek 54 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B5 pro všechny provedené zkoušky	67
Obrázek 55 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 příčný směr při poměrném prodloužení 30 %.....	69
Obrázek 56 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 podélný směr při poměrném prodloužení 30 %	69
Obrázek 57 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %.....	70

Obrázek 58 – Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 příčný směr při poměrném prodloužení 60 %.....	70
Obrázek 59– Závislost napětí na teplotě v tahu pro směs B6 podélný směr při poměrném prodloužení 60 %	71
Obrázek 60 – Rozptyl hodnot napětí na měřené teplotě pro směs B6 při poměrném prodloužení 60 %.....	71
Obrázek 61 – Závislost napětí na poměrném prodloužení pro směs B6 pro všechny provedené zkoušky	72
Obrázek 62 – Srovnání napětí pro všechny materiálové směsi při poměrném prodloužení 30 % a zkoušky jednoosým tahem, čistým smykem a dvouosou napjatostí	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení jednotlivých kaučukových směsí.....	36
Tabulka 2: Informace o zařízení	36
Tabulka 3: Informace o zařízení	38
Tabulka 4: Informace o zařízení	40
Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %.....	43
Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B1 při poměrném prodloužení 60 %.....	43
Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %.....	47
Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B1 při poměrném prodloužení 30 %.....	47
Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %.....	48
Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B2 při poměrném prodloužení 60 %.....	48
Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %.....	52
Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B2 při poměrném prodloužení 30 %	52
Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %.....	53
Tabulka 14: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B3 při poměrném prodloužení 60 %.....	53
Tabulka 15: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %.....	57
Tabulka 16: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B3 při poměrném prodloužení 30 %	57
Tabulka 17: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %.....	58
Tabulka 18: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B4 při poměrném prodloužení 60 %.....	58

Tabulka 19: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %.....	62
Tabulka 20: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B4 při poměrném prodloužení 30 %	62
Tabulka 21: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %.....	63
Tabulka 22: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B5 při poměrném prodloužení 60 %.....	63
Tabulka 23: Tabulka 24: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %	67
Tabulka 25: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B5 při poměrném prodloužení 30 %	67
Tabulka 26: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %.....	68
Tabulka 27: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs B6 při poměrném prodloužení 60 %.....	68
Tabulka 28: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %.....	72
Tabulka 29: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs B6 při poměrném prodloužení 30 %	72

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha na CD:

- Bakalářská práce v elektronické podobě