

Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů

Jiří Kolařík

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jiří Kolařík
Osobní číslo:	T18187
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

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

Seznam doporučené 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.
Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US, 2009, 321 s. ISBN 978-0-387-78746-6.

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

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo zkoušení 5 různých elastomerů a stanovení jejich mechanických vlastností. V teoretické části je rozebrána problematika kaučuků a jejich směsí, mechanických modelů a zkoušek určených pro elastomery.

V praktické části byl každý jednotlivý materiál zkoušen na jednoosou napjatost za různých teplot, dvouosou napjatost a čistý smyk. Výsledky těchto zkoušek byly uvedeny pomocí tabulek a grafů.

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

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was to test 5 different elastomers and determine their mechanical properties. Theoretical part deals with the issue of rubbers and their mixtures, mechanical models and tests for elastomers.

In the practical part, each individual material was tested for uniaxial stress at different temperatures, biaxial stress and pure shear. The results of these tests were presented by using tables and graphs.

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

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

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KAUKYKY	12
1.1 PŘÍRODNÍ KAUKYKY	12
1.2 SYNTETICKÉ KAUKYKY	13
1.2.1 Syntetické kaučuky pro všeobecné použití	14
1.2.2 Speciální syntetické kaučuky	15
2 KAUKYKOVÉ SMĚSI	18
2.1 PLNIVA	19
2.2 ZMĚKČOVADLA	19
2.3 ANTIDEGRADANTY	19
2.4 VULKANIZAČNÍ SYSTÉMY	20
2.4.1 Vulkanizační činidla	20
2.4.2 Aktivátory vulkanizace	20
2.4.3 Urychlovače vulkanizace	21
2.4.4 Retardéry vulkanizace	21
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	22
3.1 HYPERELASTICITA	22
3.2 MODEL Y	23
3.2.1 Polynomický model	25
3.2.2 Mooney-Rivlin model	25
3.2.3 Neo-Hookean model	26
3.2.4 Ogden model	27
3.2.5 Yeoh model	27
3.2.6 Arruda-Boyce model	27
3.2.7 Gent model	28
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	29
4.1 JEDNOOSÁ NAPJATOST (TAHOVÁ ZKOUŠKA)	29
4.2 DVOUOSÁ NAPJATOST	31
4.3 ČISTÝ SMYK	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
5 CÍL PRÁCE	36
5.1 ZKUŠEBNÍ MATERIÁL.....	36
5.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	36
5.2.1 Podmínky měření a zkušební zařízení.....	36
5.2.2 Zkušební tělíska	37
5.2.3 Postup měření.....	37

5.2.4	Zpracování výsledků	38
5.3	ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI.....	38
5.3.1	Podmínky měření a zkušební zařízení.....	38
5.3.2	Zkušební tělíska	39
5.3.3	Postup měření.....	40
5.3.4	Zpracování výsledků	40
5.4	ZKOUŠKA ČISTÝM SMYKEM.....	41
5.4.1	Podmínky měření a zkušební zařízení.....	41
5.4.2	Zkušební tělíska	41
5.4.3	Postup měření.....	42
5.4.4	Zpracování výsledků	42
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	43
6.1	MATERIÁL C1	43
6.1.1	Tahová zkouška.....	43
6.1.2	Zkouška dvouosé napjatosti	47
6.1.3	Zkouška Čistým smykem.....	47
6.1.4	Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení.....	47
6.2	MATERIÁL C2	48
6.2.1	Tahová zkouška.....	48
6.2.2	Zkouška dvouosé napjatosti	52
6.2.3	Zkouška čistým smykem.....	52
6.2.4	Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení.....	52
6.3	MATERIÁL C3	53
6.3.1	Tahová zkouška.....	53
6.3.2	Zkouška dvouosé napjatosti	57
6.3.3	Zkouška čistým smykem.....	57
6.3.4	Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení.....	57
6.4	MATERIÁL C4	58
6.4.1	Tahová zkouška.....	58
6.4.2	Zkouška dvouosé napjatosti	62
6.4.3	Zkouška čistým smykem.....	62
6.4.4	Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení.....	62
6.5	MATERIÁL C5	63
6.5.1	Tahová zkouška.....	63
6.5.2	Zkouška dvouosé napjatosti	67
6.5.3	Zkouška čistým smykem.....	67
6.5.4	Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení.....	67
6.6	SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO VŠECHNY MATERIÁLY	68
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	69
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74

SEZNAM OBRÁZKŮ	76
SEZNAM TABULEK.....	79

ÚVOD

Elastomery v dnešní době považujeme za významný konstrukční materiál. Jedná se o početnou skupinu polymerních materiálů, se kterými se můžeme setkat ve většině výrobních oborů, přístrojů či zařízeních. Mezi nejznámější odvětví použití patří výroba pneumatik a automobilový průmysl.

Výchozím materiálem pro výrobu elastomerů jsou kaučuky, těch rozeznáváme dva druhy, a to přírodní, které se získávají z latexu, a syntetické, které získáme chemickou cestou polymerací. Kaučuky se přimíchávají do gumárenských směsí společně s dalšími přísadami, podle výsledných požadovaných vlastností a následně proběhne vulkanizace, což je síťování a vytváření chemických vazeb.

Základní vlastností elastomerních materiálů je značná pružnost a poddajnost už i při malých zatíženích. Za běžných podmínek jsme schopni je i za působení malé síly velmi deformovat bez porušení, většinou jde o vratné deformace. Pro elastomery neplatí Hookeův zákon a závislost napětí na deformaci je zde výrazně nelineární. Souhrn těchto vlastností nazýváme hyperelasticitou.

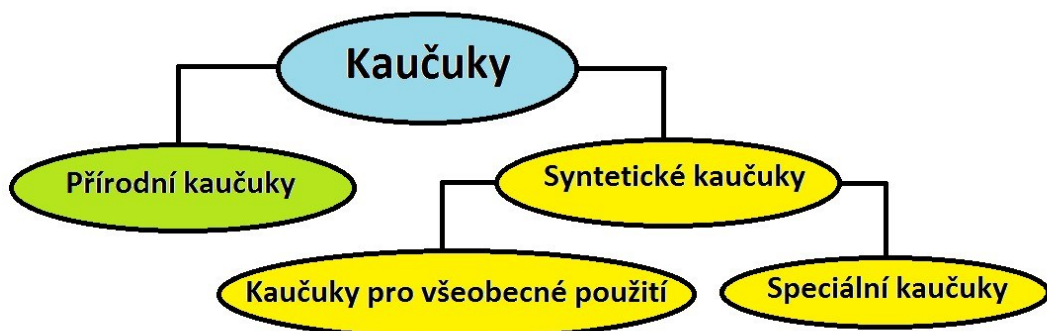
Přesné složení materiálu jednotlivých směsí nám často není známo a zůstává jako tajemství výrobců. Pro zhodnocení vhodnosti elastomeru je třeba změřit jeho mechanické vlastnosti. U jednotlivých typů elastomerů je tedy nejprve nutné zjistit materiálové konstanty za pomoci různých typů mechanických zkoušek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KAUČUKY

Kaučuk se začal v Evropě vyskytovat už na počátku 19. století, zlom v možnostech jeho použití v technickém průmyslu však nastal až s příchodem amerického chemika a vynálezce Charlese Goodyeara, který v roce 1839 přišel na způsob jeho vulkanizace. Od této doby materiál nacházel krok za krokem široké uplatnění v mnoha oborech.

Kaučuky známe jak přírodní, tak syntetické. Řadí se mezi polymery, kterým říkáme elastomery. Tyto polymery se vyznačují především elastickou deformací. Tato vlastnost znamená, že pokud na těleso působíme vnější silou, těleso se deformuje, ale poté, co silou působit přestaneme, se těleso vrací do svého tvaru před zatížením. Tato vlastnost se vyskytuje u elastomerů po vulkanizaci, ale i před vulkanizací. Během vulkanizace dojde k zesíťování a z kaučuků se stávají pryže. Hlavní rozdíl mezi surovým kaučukem a pryží je v tom, že surový kaučuk je za tepla lepivý, za studena tuhý a nepružný. Pryž je oproti tomu elastická v širokém rozmezí teplot. [1,2,3,17]



Obr. 1: Základní druhy kaučuků

1.1 Přírodní kaučuky

Přírodní kaučuk značíme NR (z anglického natural rubber), volně se vyskytuje v přírodě a můžeme jej získat z různých rostlin, a to v podobě tekutiny, která se nazývá latex. Latex je látka bílé barvy, která se ve všech ohledech vzhledově na první pohled podobá mléku.

Pro gumárenský průmysl je v tomto ohledu nejvýznamnější strom *Hevea Brasiliensis* (kaučukovník brazilský), který vyrůstá až do výšky okolo 30 metrů. Strom pochází z Jižní Ameriky, v dnešní době se ale jeho plantáže nachází v různých oblastech po celém světě v místech s tropickým klimatem.

Získávání latexu ze stromu probíhá pomocí zářezů do jeho kmene, přičemž následuje čepování. Čepování provádíme u jednoho stromu po dobu zhruba třiceti let, poté je obvykle ukončeno pro klesající výtěžnost.

Do čerstvého latexu se kvůli stabilizaci přidávají také různé další látky, jako jsou například alkoholy, cukry a bílkoviny. Latex ovšem obsahuje po čepování vysoké množství vody, a proto se před jeho další dopravou a zpracováním provádí koncentrace. Způsoby koncentrace mohou být odstředěním, odpařením nebo rozvrstvením. Přírodní kaučuk se využívá zejména pro výrobu pneumatik. [2,3,4,20]



Obr. 2: Těžba přírodního kaučuku z kaučukovníku brazilského [19]

1.2 Syntetické kaučuky

Syntetické kaučuky byly vytvořeny jako možnost nahrazení přírodního kaučuku. Počátky prvních vyrobených syntetických kaučuků datujeme do počátku 20. století, mezi první patří polyisopren a polybutadien, o něco později přišel také neopren.

Syntetické kaučuky se oproti přírodním liší především v technologii, jakou se vyrábí. Oproti přírodnímu kaučuku, který se získává ze stromu *Hevea Brasiliensis*, se syntetické kaučuky vyrábějí uměle, chemickou cestou pomocí polymerace monomerů, které se získávají z petrochemických surovin. Syntetické kaučuky můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to na kaučuky pro všeobecné použití a speciální kaučuky. [2,3]

1.2.1 Syntetické kaučuky pro všeobecné použití

Pro kaučuky pro všeobecné použití je typická relativně nízká cena a velká spotřeba. Dodávají pryžím dobrou odolnost proti oděru, vysokou pevnost a také zvyšují odrazovou pružnost. Většina těchto kaučuků nemá dobrou odolnost proti stárnutí, proto je výhodné v jejich směsích použít různých stabilizátorů, aby se zamezilo jejich degradaci.

Mají širokou oblast použití, např. na pneumatiky, zdravotnické zboží, lepidla a nátěrové hmoty, hadice, gumovou obuv, golfové míčky a dopravní pásy. [2]

1.2.1.1 Butadienový kaučuk (BR)

Jeho výroba se provádí roztokovou polymerací za pomoci různých kovových katalyzátorů. Použitý kovový katalyzátor ovlivňuje následné vlastnosti vyrobeného kaučuku.

BR se používá zejména ve směsích s NR a SBR. Nejvíce se aplikuje v odvětví výroby pneumatik. [2,3]

1.2.1.2 Butadien-styrenový kaučuk (SBR)

Vyrábí se kopolymerací butadienu a styrenu. Polymeraci SBR kaučuků realizujeme emulzí, kterou můžeme provádět za více možných teplot. Typy pro běžné použití obvykle obsahují okolo 24% styrenu.

Butadien a styren řadíme mezi monomery, které ochotně polymerují a kopolymerují za použití různých způsobů a mechanismů. Můžeme z nich vyrobit řadu látek, ať už plastů nebo elastomerů. Z tohoto důvodu SBR kaučuky nemůžeme zcela jednoznačně specifikovat a dále je klasifikujeme na různé podmonožiny.

Vlastnostmi se velmi podobá přírodnímu kaučuku, jeho výhodou je lepší tepelná vodivost, avšak elastické vlastnosti má horší. V současné době se řadí k nejvíce používaným a zpracovávaným kaučukům na celém světě. [2,3]

1.2.1.3 Isoprenový kaučuk (IR)

Jedná se o kaučuk, jehož vlastnosti se nejvíce blíží přírodnímu kaučuku. Tyto kaučuky jako jediné můžeme označovat za umělé. Výrobu uskutečňujeme polymerací v roztoku, pomocí dvou iniciačních systémů, těmi jsou akyllitiové katalyzátory a katalyzátory Zieglerova typu.

Oproti přírodnímu kaučuku, isoprenový není tak lepivý, tolik nezapáchá a jeho vulkanizace probíhá pomalejším tempem. Má také lepší vlastnosti ke zpracování, vyšší tažnost a nižší modul pružnosti v tahu.

Používá se například ve zdravotnickém průmyslu, z důvodu možné alergické reakce některých pacientů na proteiny a nečistoty obsažené v přírodním kaučuku. V současné době se však jeho pole využití zmenšuje a výroba klesá. To je způsobeno zejména ekonomickou stránkou, protože jeho cena je v porovnání s přírodním kaučukem značně vyšší. [3,6]

1.2.1.4 Ethylen-propylenový kaučuk (EPM a EPDM)

EPM kaučuky jsou vyráběny pomocí kopolymerace ethylenu a propylenu. Jejich vlastnosti jsou ovlivněny zejména molekulární hmotností a poměru mezi monomery ethylenu a propylenu. Oproti přírodním nebo butadien-styrenovým kaučukům síťování nemůže probíhat pomocí síry, vulkanizace EPM se tedy uskutečňuje pomocí peroxidů nebo radiace.

EPDM (ethylen-propylen-dienový kaučuk) vzniká, je-li v řetězci obsažen kromě monomerů ethylenu a propylenu také třetí monomer nekonjugovaný dien. EPDM již lze síťovat také pomocí síry.

Mají velmi dobrou odolnost proti stárnutí, odolávají vodě a povětrnosti a vynikají svými elektroizolačními vlastnostmi. Používají se např. k výrobě těsnění pro okna, střešních fólií, k opláštění kabelů nebo k izolaci vodních nádrží. [2,6,20]

1.2.2 Speciální syntetické kaučuky

Speciální kaučuky většinou používáme v případech, kdy nelze použít kaučuky pro všeobecné použití kvůli jejich nedostatečným vlastnostem. Jsou to obvykle případy, kdy potřebujeme jejich dlouhodobou odolnost vůči olejům nebo zvýšeným teplotám. Podle toho je dále můžeme rozdělit na olejovzdorné a teplovzdorné.

Olejovzdorné kaučuky využíváme např. pro výrobu různých hadic, těsnění a obuvi. Teplovzdorné kaučuky se používají pro tepelně namáhané součástky a k jejich izolaci. Často jsou také používány pro výrobu dudlíků, kousátek nebo kontaktních čoček. [2,3]

1.2.2.1 Chloroprenový kaučuk (CR)

Chloroprenový kaučuk patří mezi olejovzdorné kaučuky. Je to jeden z nejstarších syntetických kaučuků a vyrábíme ho obvykle pomocí emulzní polymerace.

Mezi jeho přední vlastnosti patří jeho odolnost proti působení olejů a chemikálií, vynikající houževnatost a dobrá odolnost proti hoření. Používá se např. pro výrobu lepidel, klínových řemenů nebo těsnění. [2,3,6]

1.2.2.2 Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR)

Stejně, jako chloroprenový kaučuk i NBR získáváme ho pomocí emulzní polymerace. Je to kopolymer butadienu a akrylonitrilu. Z ekonomického hlediska se jedná o nejlevnější olejovzdorný elastomer.

Mezi jeho vlastnosti patří vysoká odolnost vůči nabobtnání v olejích a nepolárních rozpouštědlech. Dobře odolává teplu a umožňuje dlouhodobé použití až do teplot okolo 107°C. Velmi se využívá v automobilovém průmyslu na různá těsnění, která jsou vystaveny olejům a vyšším teplotám. [3,6]

1.2.2.3 Akrylátový kaučuk (ACM)

Jedná se také o olejovzdorný kaučuk. Vyrábí se emulzní polymerací a typické monomery jsou ethylakrylát, butylakrylát a methoxyethylakrylát. V porovnání s NBR kaučuky jsou o něco dražší.

Mají velmi dobrou odolnost vůči ropným olejům a palivům, a to i za vyšších teplot, dlouhodobě je lze používat až do teplot mezi 150°C až 175°C. Jejich nevýhodou je poměrně nízká pevnost. Hlavní oblast použití ACM kaučuků se vztahuje na těsnění automobilových motorů, hadic a různých převodů. [2,6]

1.2.2.4 Polysulfidový kaučuk (OT)

OT kaučuky se vyrábí polykondenzací polysulfidu sodného a organického dichloridu. Ze všech kaučuků vykazují asi nejlepší odolnost vůči olejům a polárním rozpouštědlům, ale nejsou teplovzdorné. Také dobře odolávají povětrnostním podmínkám. [2,3]

1.2.2.5 Silikonové kaučuky (Q)

Jedná se o kaučuk, jehož pevnost není příliš vysoká, ale jeho fyzikální vlastnosti se mění jen velmi málo v širokém rozsahu teplot. Jejich běžné použití bývá v teplotách od -60°C do +180°C, přičemž horní teplota, při níž se dají dlouhodobě používat je 205°C.

Mají velmi dobrou odolnost proti povětrnosti a ozonu, také odolávají hoření. Mezi jejich další přednosti patří výborné elektroizolační vlastnosti. Mezi další klady také patří jejich snášenlivost s lidským organismem.

Nevýhodou je špatná odolnost proti kyselinám a různým dalším kapalinám. Špatně snáší vlhké prostředí, za vyšších teplot podléhají rozkladu.

Používají se zejména v místech, kde je požadována vysoká tepelná odolnost nebo kde je potřeba ohebnost za velmi nízkých teplot. Aplikují se zejména v leteckém průmyslu, kosmonautice nebo na automobilové zapalovací kabely. Můžou ale být také použity na různé věci pro děti. [2,3,6]



Obr. 3: Příklady výrobků pro děti ze silikonového kaučuku [2]

1.2.2.6 Fluorokaučuky (FKM, FFKM)

Mají vůbec nejlepší odolnost za zvýšených teplot ze všech kaučuků, dobrou odolnost proti olejům a většině chemikálií. Existuje více typů fluorokaučuků, čím větší mají tyto kaučuky obsah fluoru, tím lépe odolávají kapalinám.

FKM jsou fluoruhlodíkové kaučuky. Dobře odolávají oxidaci, palivům nebo ropným olejům. Aplikují se například u palivových hadic automobilů z vnitřní vrstvy, kde dochází ke styku s palivem.

FFKM kaučuky jsou kopolymery perfluormethylvinyleteru a tetrafluorethylenu. Jejich chemická odolnost je vynikající, blíží se PTFE (teflonu). Lze je dlouhodobě používat až do teplot kolem 260°C. Aplikují se na místech, kde nelze použít jiné elastomery, protože jsou finančně velmi nákladné. [3,6]

2 KAUČUKOVÉ SMĚSI

Pouze z kaučuku nedokážeme vytvořit pryž. K tomu je zapotřebí kaučukové (gumárenské) směsi, které dosáhneme přidáním různých přísad. Ta umožní vulkanizaci a dodá pryži požadované vlastnosti. Směs obsahuje kromě kaučuku různá vulkanizační činidla, urychlovače vulkanizace, plniva, aktivátory, antidegradanty, změkčovadla, retardéry a další. Každá složka směsi má svůj význam, vybíráme je podle požadovaných výsledných vlastností, zpracovatelnosti a ekonomické stránky.

Samotný vývoj kaučukové směsi, která by měla být konkurenceschopná na trhu je značně nákladný, z tohoto důvodu se gumárenské podniky snaží jimi používané receptury chránit a nikomu je nesdělují.

Při vývoji je nutno nejprve vybrat kaučuk (můžeme zvolit i kombinaci více typů) s nejbližšími požadovanými vlastnostmi, jako základ směsi podle zamýšlené aplikace. Vlastnosti takto vybraného kaučuku dále modifikujeme pomocí přísad s ohledem na cenu, zpracovatelnost a vlastnosti.

Koncentraci přísad obvykle označujeme dsk (díly na sto dílů kaučuku) nebo phr (anglicky parts per hundred rubber). V kaučukové směsi se vždy nachází 100 dílů kaučuku.

Vývoj kaučukové směsi:

- Podle zadání zákazníka se připraví směs
- Provede se zkouška v provozu, podle které se směs případně upraví
- Vyrobíme zkušební sérii a zdokonalíme výrobní postup
- Výrobek odzkoušíme v praxi, provedeme možné finální úpravy směsi

Cíle vývoje směsi:

- Abychom zajistili směsi požadované vlastnosti výrobku
- Aby směs bylo možné zpracovávat na strojích, které máme k dispozici
- Abychom dosáhli co nejnižších nákladů na výrobu

Potřebujeme splnit všechny cíle, pokud některý dílčí nevyhovuje, nepomůže ani, pokud by ostatní byly vynikající. [7]

2.1 Plniva

Za hlavní složky kaučukové směsi se označují kaučuk, vulkanizační systém a změkčovadla, ovšem takovou směs samotnou by v praxi nebylo možné technicky použít. To je důvod, proč do směsi přidáváme plniva, které upraví vlastnosti směsi. Ovlivní jak mechanické vlastnosti, jako je pevnost a tažnost, tak dynamické vlastnosti a zpracovatelnost. Dalším důvodem je ekonomická stránka, díky použitím levných druhů plniv dosáhneme značné snížení ceny výrobku. Volbu druhu a množství plniva si musíme promyslet na základě požadovaných vlastností. Nejčastější forma přidávaných plniv je v podobě prášků. [3,5]

Rozeznáváme dva druhy plniv, a to aktivní a neaktivní. Aktivní plniva jsou používány za účelem změny a zlepšení různých vlastností. Neaktivní plniva používáme, aby byla snížena cena výrobku, jak jen je to možné, volí se proto obvykle plniva, která mají nízkou hustotu a jsou levnější. Plniva, která se mohou v některém prvku chovat, jako neaktivní zase v jiném polymeru mohou působit jako aktivní. Proto je značně komplikované rozdělit plniva podle jejich funkce a příliš se nepoužívá.

V praxi spíše rozdělujeme plniva na saze a světlá plniva (např. křída, baryt nebo oxid křemičitý). [3,8,17]

2.2 Změkčovadla

Jsou to organické látky, které se vyskytují většinou v kapalné nebo tuhé fázi. Látka musí být rozpouštědlem dané směsi, aby fungovala jako změkčovadlo. Tato vlastnost se odvíjí podle polaritě látek. Látky, které lze použít jako změkčovadla polárních polymerů by tedy měly být polární a naopak.

Změkčovadla dodávají směsi ohebnost a tvárnost, také zlepšují další zpracovatelnost. Umožní nám také do směsi zakomponovat větší obsah plniv, to je výhodné ekonomicky. Jako změkčovadla používáme např. produkty ze zpracování ropy nebo dřeva. [9,5]

2.3 Antidegradanty

Antidegradanty se označují také jako stabilizátory. Jako ostatní materiály, i pryž časem vlivem stárnutí mění své technické vlastnosti (obvykle k horšímu). Úkolem antidegradantů je dlouhodobá ochrana pryže před vnějšími vlivy, jako jsou kyslík, sluneční záření, ozón

nebo tepelná energie. Největší vliv při stárnutí má patrně kyslík, který dokáže spouštět oxidační reakci.

Přírodní kaučuk před vulkanizací obsahuje určité množství antioxidantů, díky nimž lze kaučuk skladovat poměrně dlouho. Při vulkanizaci a zpracování ale o tyto přirozené antioxidanty přijde a je potřeba je také nahradit antidegradanty.

Rozlišujeme několik základních druhů antidegradantů, a to antioxidanty, antiozonanty a světelné stabilizátory. Některé z nich mohou být jak antiozonanty, tak současně také antioxidanty. Antioxidanty chrání pryž před působením kyslíku, antiozonanty před ozonem a světelné stabilizátory absorbují UV záření. [1,2,3]

2.4 Vulkanizační systémy

Vulkanizační systém se skládá z přísad, které podstatným způsobem ovlivňují vlastnosti konečného výrobku a pomocí kterých tedy dosáhneme požadovaných vlastností pryže. Mezi tyto přísady řadíme vulkanizační činidla, aktivátory vulkanizace, retardéry vulkanizace a urychlovače vulkanizace. [3,7]

2.4.1 Vulkanizační činidla

Jsou základní složky vulkanizace. Způsobují chemickou reakci, která umožňuje vytvoření příčných vazeb mezi molekulami uhlovodíků v kaučuku. Vulkanizací způsobuje přechod plastických vlastností kaučuku na elastické. Vulkanizací docílíme zlepšení vlastností, např. zvýšíme tvrdost, pevnost, odrazovou pružnost nebo modul pružnosti v tahu. Nejčastějšími materiály, které používáme, jako vulkanizační činidla jsou síra, selen, telur, oxidy kovů, peroxidy a reaktivní pryskyřice. Každé činidlo má specifický vliv na vulkanizát a použití různých prvků tedy volíme podle požadovaných vlastností a typu kaučuku. [3,7]

2.4.2 Aktivátory vulkanizace

Aktivátory mohou být organické a anorganické látky, díky kterým dochází k aktivaci účinku vulkanizačních činidel a zmírňují závislost vulkanizace na aktuální teplotě. Do skupiny aktivátorů patří z anorganických látek oxidy kovů, jako jsou třeba ZnO (oxid zinečnatý), MgO (oxid hořečnatý), CaO (oxid vápenatý). Z organických látek to jsou např. mastné kyseliny a jejich soli. Nejběžnější aktivátor je pravděpodobně ZnO. [3,7,17]

2.4.3 Urychlovače vulkanizace

Jedná se pravděpodobně o nejdůležitější složky v gumárenské směsi. Mají podstatný vliv na průběh vulkanizace a fyzikální vlastnosti vulkanizátu. Významně zkracují průběh vulkanizace, někdy také snižují vulkanizační teplotu. V praxi se může používat více typů urychlovačů současně, které se vzájemně ovlivňují.

Urychlovače můžeme rozdělit podle účinnosti ve vulkanizačním procesu na pomalé, rychlé, velmi rychlé. Mezi představitele pomalých urychlovačů patří např. guanidiny. [3,7,10]

2.4.4 Retardéry vulkanizace

Retardéry plní ve směsi především funkci, kterou je ochrana před předčasným navulkanizováním směsi během míchání a zpracování. Můžeme říct, že retardéry jsou urychlovače s pozdějším účinkem. Ovlivňují zpracovatelskou bezpečnost, ale neměly by ovlivnit konečný stav vulkanizace. Příklady retardérů jsou třeba kyselina benzoová, salicylová nebo ftalová. [3,5]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ

Vlastnosti elastomerů se výrazně odlišují od jiných materiálů. Vlastnosti, jež popisují chování materiálu lze rozdělit na dvě skupiny. Do první skupiny zahrnujeme fyzikální vlastnosti a do druhé skupiny vlastnosti chemické. Vlastnosti se mohou lišit, obzvláště jsou ovlivněny způsobem výroby a působením vnějších vlivů, jako jsou např. teplota a čas. Z tohoto důvodu je třeba před aplikací elastomeru provést zkoušku a zjistit materiálové vlastnosti.

Fyzikálními vlastnostmi rozumíme především pružnost, pevnost, tvrdost, houževnatost a plasticitu. Mezi další vyhodnocené vlastnosti patří modul pružnosti v tahu/tlaku E [MPa], modul pružnosti ve smyku G [MPa], objemový modul pružnosti K [MPa] nebo koeficient příčné kontrakce, který nazýváme Poissonovo číslo a značíme μ [-]. Tyto vlastnosti se stanovují experimentální metodou.

Chemickými vlastnostmi rozumíme např. stabilitu v odlišných prostředích, elektrické vlastnosti, nepropustnost tekutin nebo odolnost vůči působení kyselin.

Mechanické chování elastomerů dále silně závisí na teplotě, pod -50°C tuhost materiálu zřetelně roste, naopak při teplotách nad 100°C tuhost velmi klesá. [11]

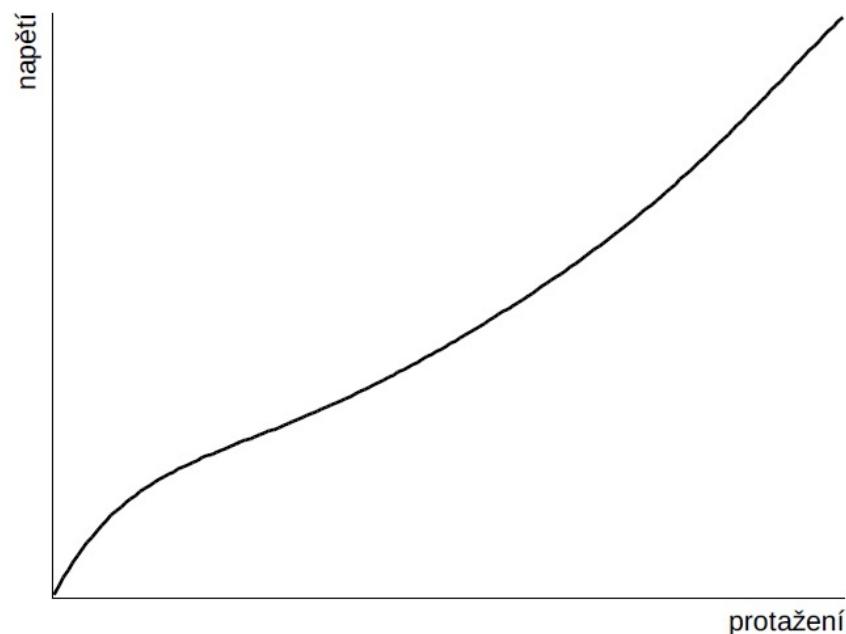
3.1 Hyperelasticita

Typickou vlastností elastomerů, kde výrazně vynikají oproti jiným materiálům, je jejich vysoká elasticita, proto elastomery označujeme za hyperelastické látky.

Hyperelasticitu určuje několik hlavních znaků:

- Dosažení velké elastické deformace, jež jsou mnohonásobně vyšší, než u ideálně elastických látek. Protážení materiálu v době, kdy dochází k přetržení, obvykle dosahuje až několika set procent původní délky.
- Nelineární závislost napětí na deformaci. Závislost má obvykle charakteristický esovitý průběh. (Obr. 4)
- K deformaci materiálu stačí na něj působit malými silami. Poměr napětí a deformace za této situace je u ideálně elastických látek asi desetitisíckrát větší, než v tomto případě.

- Objemová tuhost je u elastomerů obvykle hodně vysoká, objemový modul pružnosti pak může dosahovat až několik tisíc MPa. Poměr mezi napětím a deformací je malý, Poissonovo číslo se blíží hodnotě 0,5. Z toho plyne, že můžeme považovat převážnou část těchto materiálů za objemově nestlačitelné.



Obr. 4: Závislost napětí a deformace během zatěžování elastomerů [11]

Podle uvedených vlastností lze říci, že nemůžeme použít Hookeův zákon, jelikož závislost deformace na napětí je zde nelineární a vyskytují se velké deformace. Ačkoli je tento vztah možný použít pro aplikace, ve kterých se nepočítá s většími deformacemi prvku, jenž je zatěžován, tak pro výpočty přesnějšího charakteru je potřeba užít nelineární popis závislosti napětí vůči deformaci. [11]

3.2 Modely

Nelineární hyperelastické materiálové modely se začaly velice intenzivně vyvíjet už od 50. let 20. století, byl navržen velký počet těchto modelů různými autory.

Modely se zakládají na definování vztahu pro potenciál deformační energie W , nezávisí na rychlosti a historii deformace.

Aktuálně používané hyperelastické modely vyjadřují vztah pro měrnou deformaci W .

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

nebo

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

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 i ku původní délce l_0 nazýváme protažení a značíme λ_i .

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

Definice deformačních invariant:

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

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

Nestlačitelné materiály mají hodnotu invariantu I_3 rovnu 1.

Za předpokladu, že známe funkci W , jsme schopni vypočítat napětí jako derivaci této funkce podle náležité složky deformace.

$$S_{ij} = 2 \frac{W}{C_{ij}} \quad (5)$$

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

V případě, že souřadný systém je zvolen tak, že se shoduje s hlavními směry deformace, potom nastává situace, že je pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován tímto způsobem:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Z rovnice (7) je možné tedy odvození vztahu pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\frac{W}{I_1}C_{ij} - 2\frac{W}{2}C_{ij}^{-1} \quad (7)$$

kde p je nespécifikovaný tlak, který závisí na okrajových podmínkách a δ_{ij} je Kronekerovo delta, u nějž platí ($\delta_{ij} = 1, i = j; \lambda_{ij} = 0, i \neq j$) [11,14]

3.2.1 Polynomický model

Polynomická funkce závisí na deformačních invariantech (I_1, I_2). Tato forma nachází uplatnění pro deformace, které dosahují až 300%.

Model má podobu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (8)$$

kde c_{ij} značí materiálové konstanty, za N dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna, nicméně hodnota N zpravidla bývá nižší, než 3. [11,16]

3.2.2 Mooney-Rivlin model

Jedná se o model, u kterého můžeme říct, že se jedná o speciální případy polynomické formy. V polovině 20. Století byl nejprve Mooneym navrhnout fenomenologický model, který se skládal ze dvou parametrů založených na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem v průběhu jednoduché smykové deformace. Tento model byl dále modifikován Rivlinem.

Existují určité varianty tohoto modelu, které využívají různý počet parametrů. Používáme dvou, tří, pěti a devíti parametrové modely.

Nejčastěji používanou variantou je dvou-parametrový model, který se v praxi aplikuje až do 100% tahové deformace, ale nemusí dojít k správnému charakterizování chování materiálu při stlačení. Tato varianta je obdobou polynomického modelu s $N = 1$.

Definice dvou-parametrového modelu:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (9)$$

kde c_{10}, c_{01} rozumíme materiálové konstanty.

Tří-parametrový model se shoduje s polynomickeou formou za situace, že $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$:

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

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} rozumíme materiálové konstanty.

Pěti-parametrový model se shoduje s polynomickeou formou za situace, že $N = 2$:

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

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} rozumíme materiálové konstanty.

Devíti-parametrový model se shoduje s polynomickeou formou za situace, že $N = 3$:

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

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} , c_{03} , rozumíme materiálové konstanty.

Pěti a devíti-parametrové modely můžeme aplikovat pro deformace, které dosahují až 300%. [11,16]

3.2.3 Neo-Hookean model

Řadí se mezi nejstarší a nejjednodušší modely, můžeme ho označit za podmnožinu polynomickeého modelu. Tento model se opírá o termodynamické principy a statický přístup k modelování vnitřní struktury elastomerů. Pomocí tohoto modelu nedokážeme řádně zachytit závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů, při smykové deformaci se navíc model chová lineárně. Tento model je vyhovující pro aplikaci u deformací do 40% v jednoosém namáhání.

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) \quad (13)$$

kde μ rozumíme počáteční smykový modul s formou:

$$\mu = nkT \quad (14)$$

kde n označuje počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota. [11,16]

3.2.4 Ogden model

Model podle Ogdena se v dnešní době velmi využívá. Tento model se zakládá na funkci vyjádřené pomocí hodnot hlavních protažení. Pomocí této funkce lze poměrně dobře vystihnout, jak se budou elastomery chovat i při větších deformacích. Model můžeme použít pro deformace až do 700%. Pokud dosadíme specifické hodnoty, může se Ogden model stát ekvivalentním k modelům Neo-Hookean a Mooney-Rivlin.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (15)$$

kde μ_i a α_i označují materiálové konstanty, které nemají konkrétní fyzikální význam. Za N dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna, ale ve většině případů hodnota N není vyšší, než 3. [11]

3.2.5 Yeoh model

Model, který se podobá polynomickému modelu, ale neuplatňuje se v něm druhý deformační invariant. Mezi jeho hlavní přednosti patří jeho jednoduchost. Tento model je ovšem poměrně složitý k vyhodnocení a výsledky nejsou příliš přesné.

Tří-parametrový model nachází uplatnění v použití pro větší deformace, kde lze získat dobré výsledky. Pro deformace menších hodnot je jeho použití nevhodné.

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (16)$$

kde c_{i0} rozumíme materiálovou konstantu a za N opět dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna, ale ve většině případů hodnota N bývá nižší, než 3. V případě, že se $N = 1$ jedná se o model Neo-Hookean. [11]

3.2.6 Arruda-Boyce model

Jedná se o model, který se zakládá na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Můžeme o něm říci, že je rozšířením modelu Yeoh pro $N = 5$, konstanty zde nesou reálný význam. Tento model se uplatňuje pro deformace do 300%.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (17)$$

Konstanty C_i zde definujeme jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750} \quad (18)$$

μ nám sděluje počáteční smykový modul (identicky jako u modelu Neo-Hookean) a λ_L rozumíme tzv. „limitní protažení“ sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, což je stav, kdy už se síť dál neprotahuje a napětí se začíná přibližovat nekonečnu. V případě, že se už λ_L rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce se změní na Neo-Hookean. [11]

3.2.7 Gent model

Tento model se podobá modelu Arruda-Boyce, stejně jako on využívá limitního síťového protažení, nicméně nezakládá se na vnitřní struktuře elastomerů. Mezi přednosti modelu patří jeho jednoduchost, jelikož používá pouze dvě materiálové konstanty. Další výhodou je jeho schopnost postihnout koncovou vyztužovací fázi napěťové deformační odezvy.

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

kde E rozumíme počáteční modul pružnosti, pro nestlačitelné materiály je tento modul 3μ . I_m nám říká limitní hodnotu členu $(I_1 - 3)$, bývá obdobná k λ_L v Arruda-Boyce modelu. V případě, že se hodnota přirozeného logaritmu zvyšuje, výsledná forma bude podobná modelu Yeoh. Když I_m bude rovno nekonečnu, model se změní na formu Neo-Hookean. [11]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Za pomoci výsledků, které získáme z mechanických zkoušek, kdy prošetřujeme chování zkoušeného vzorku během zatížení vnějšími silami, jsme schopni popsat vlastnosti materiálu, ze kterého je vyroben.

Za účelem získání přesných parametrů pro hyperelastické modely, je potřeba materiál zkoušet na jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Kvůli různým vlastnostem jednotlivých elastomerů musíme přesně vytyčit pro každou konkrétní analýzu materiálové konstanty daných materiálů.

Při zkoušení elastomerů je zde několik aspektů, jež mají na výsledky zkoušky značný vliv. Mezi ně patří především čas, který nám zde určuje, jak rychle se mění působící síla, proto zatěžujeme vzorky vždy pouze rychlostí, která je normalizována. Při odlišné rychlosti bychom totiž získali jiné hodnoty. Velmi také záleží na rozměru a tvaru tělesa, které je zkoušeno. Dalším aspektem, na kterém záleží naměřené hodnoty je teplota, jelikož se elastomery chovají při různých teplotách rozdílně. [11]

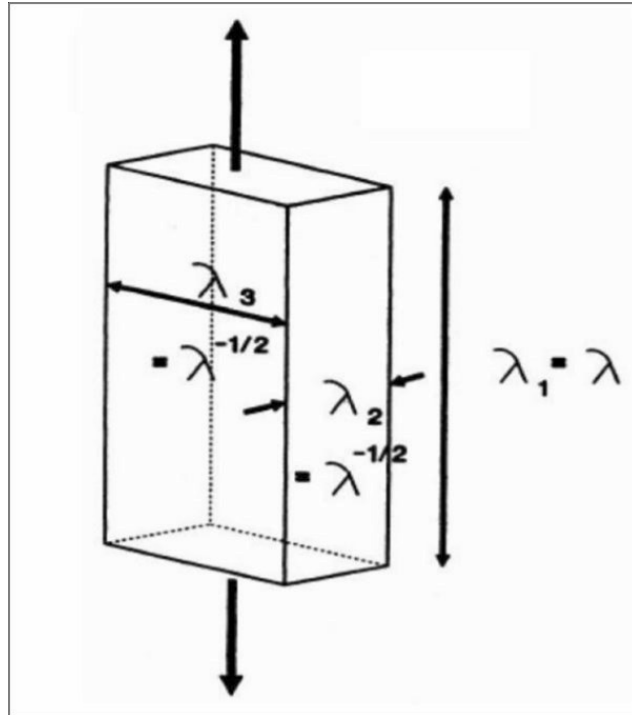
4.1 Jednoosá napjatost (tahová zkouška)

Jednoosá napjatost je definována poměrným protažením, kdy $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$. Tato deformace je založena na stavu objemové nestlačitelnosti, kde $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = 1$. Potom jsou boční strany nezatíženy a platí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Rovnice skutečného napětí poté bude:

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

kde W rozumíme deformační energii a I deformační invarianty. [15]

Podstatou těchto zkoušek je namáhání a deformování tělesa, které je zatíženo, ve směru jediné osy.



Obr. 5: Jednoosá napjatost [15]

Jedná se především o tahovou zkoušku. Norma, podle které je tato zkouška prováděna je ČSN ISO 37. Tato norma nám říká např. rozměry a tvar zkušební tělíska (oboustranné lopatky), čas zatěžování či teplotu. Zkoušku uskutečňujeme na trhacích strojích, kdy se zkušební tělíska podléhající normě deformuje stálou rychlostí, vyhodnocujeme průběh změny sledované fyzikální hodnoty.

Z hodnot, které získáme během zkoušky, jsme schopni zjistit charakteristiky materiálu.

U tahové zkoušky definujeme tyto pojmy:

Napětí v tahu – podíl síly F [N], která působí kolmo na uvažovaný průřez, a původního průřezu S [m²]. Někdy se označuje také jako smluvní napětí, značíme ho σ a jeho jednotkou jsou MPa.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (21)$$

Poměrné prodloužení – je to poměr změny délky Δl (rozdíl měřené délky pracovní oblasti zkušební tělesa ve stanoveném okamžiku oproti počáteční délce) k původně naměřené délce l_0 , značíme jej písmenem ε a udává se v procentech.

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (22)$$

Tažnost – značíme ε_p , udává se v procentech a je to poměrné prodloužení v okamžiku, kdy dojde k přetržení.

$$\varepsilon_p = \frac{(l - l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (23)$$

V praxi zjišťujeme modul v tahu, což je napětí, kterého se dosáhne při získání předem určeného prodloužení. Hodnota tohoto modulu je odlišná, než u Youngova modulu pružnosti.

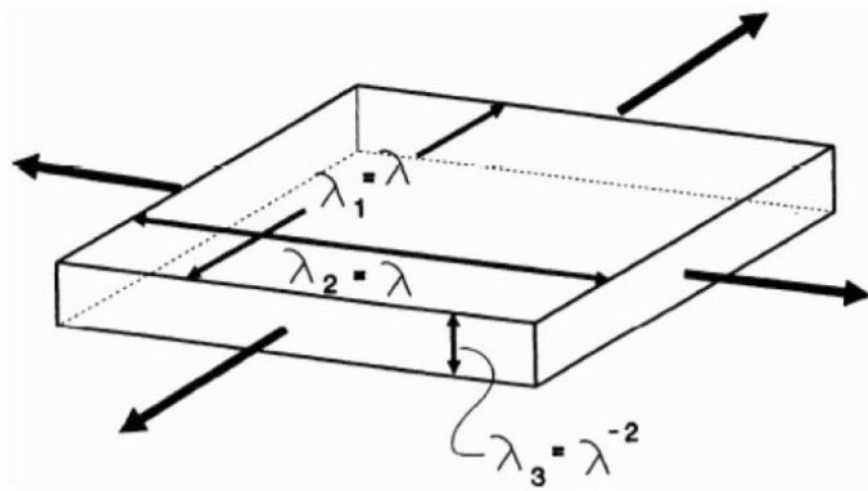
Na základě jakosti elastomerů stanovujeme modul při různých prodlouženích. U elastomerů s tažností do 400% zjišťujeme modul při proměnných prodlouženích 50,100 a 300%. Dále u elastomerů s tažností do 750% je to při proměnných prodlouženích 100,300 a 500% a pro elastomery s tažností nad 750% stanovujeme modul za proměnných prodloužení 300,500 a 700%. Jak modul, tak i pevnost mají identické jednotky [MPa], u obou dvou případů vztahujeme na původní průřez, i přesto, že jeho změna během zkoušky je patrná. Skutečný průřez v průběhu zkoušky by bylo totiž obtížné zjistit.

V praxi se můžeme setkat také s pojmem rovnovážný modul. Pod tímto označením se ukrývá hodnota modulu, která už je s časem téměř beze změny. Lze jej určit tak, že těleso plynulou rychlostí napneme na hodnotu předem stanoveného poměrného prodloužení, poté napínání zastavíme a zatížení začne postupně klesat. Po každé uplynulé minutě odečteme hodnotu modulu, dokud nedostaneme tři po sobě opakující se prakticky stejné hodnoty. Aritmetickým průměrem těchto tří hodnot získáme velikost rovnovážného modulu. [11,13]

4.2 Dvouosá napjatost

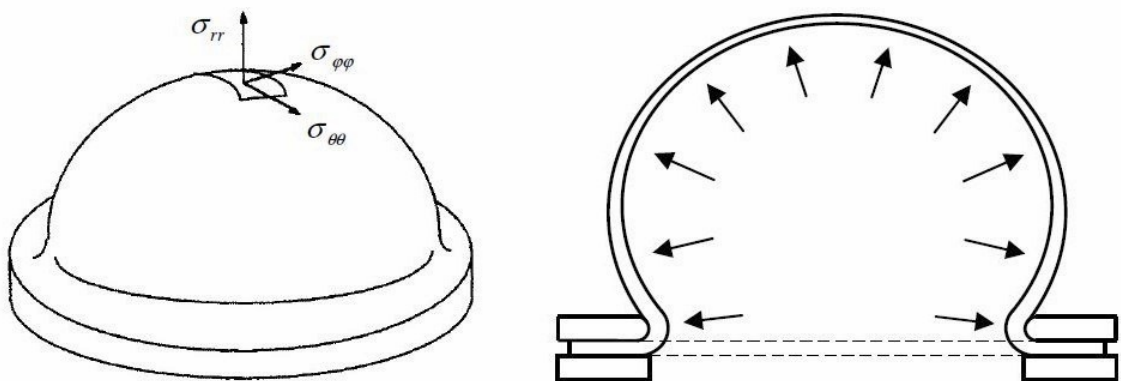
U dvouosého zatížení poměrné protažení můžeme definovat jako $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = \lambda^{-1/2}$, napětí σ_3 je zde nulové. Skutečné napětí lze vyjádřit rovnicí:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) \quad (24)$$



Obr. 6: Dvousá napjatost [15]

Při zkoušce dvousým zatížením je zkušební tělísko napínáno ve všech směrech roviny. Známe několik způsobů, jak je toto zkoušení možné uskutečnit. První variantou je roztahování čtvercového tělesa působením sil do dvou na sebe kolmých směrů. Druhou variantou je roztahování kruhového tělesa radiálně, ve směru od středu. Ve třetím případě provádíme nafukování plochého zkušebního tělíska za pomoci stlačeného vzduchu.



Obr. 7: Nafukování vzorku při třetím případě [11]

Třetí případ je po konstrukční stránce ze všech uvedených nejjednodušší. Nesnadný ovšem může být způsob, jímž zaznamenáváme deformace v průběhu testování. Stanovení tloušťky je poněkud těžké, proto zavádíme podmínku objemové nestlačitelnosti materiálu, abychom ji mohli určit.

Tloušťku poté lze vypočítat:

$$t = \frac{t_0}{\lambda^2} \quad (25)$$

kde λ rozumíme poměrné protažení a vychází z rovnice (2), t_0 je původní tloušťka.

Jelikož jde o membránu, vztah pro napětí získáme dosazením rovnice (25) do obecné rovnice membránového napětí:

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{2 \cdot t_0} \quad (26)$$

kde p rozumíme tlak, který působí na zkušební tělísko, r značí poloměr oblouku, λ je poměrné protažení, což vychází z rovnice (2) a t_0 je původní tloušťka. [11,12,15]

4.3 Čistý smyk

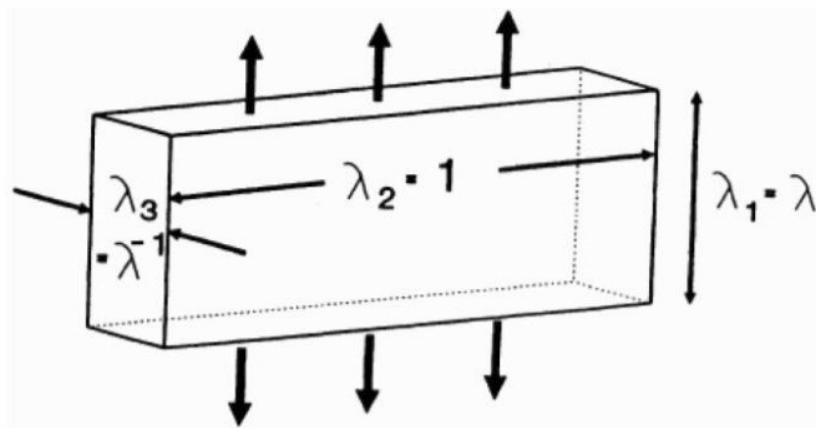
Čistým smykem rozumíme stav, kdy je zatížení aplikováno ve směru 1 a současně zabráněno změně šířky ve směru 2 ($\lambda_2 = 1$). Během deformace žádná z hlavních os nerotuje. Vzorek má znatelně vyšší vodorovnou šířku, než svislou výšku (asi 10x).

Skutečné napětí v protahovaném směru t můžeme stanovit:

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (27)$$

Skutečné vedlejší napětí t_2 můžeme stanovit:

$$t_2 = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (28)$$



Obr. 8: Čistý smyk [15]

Při zkoušce se zkušební tělísko upne a následně začne podélně natahovat v jednom směru. Je zde podoba s tahovou zkouškou. [12,15]



Obr. 9: Upnutí vzorku při zkoušce smykem

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo stanovit vlastnosti pěti různých vybraných elastomerů. Tyto vlastnosti se zjišťovaly za pomoci mechanických zkoušek, které jsou blíže popsány v kapitole 4. Jednalo se konkrétně o zkoušku tahem, která byla provedena za různých teplot, dále o zkoušku čistým smykem a zkoušku dvouosé napjatosti.

5.1 Zkušební materiál

Informace o použitých směsích a jejich složení jsou zaznamenány v tabulce 1.

Tabulka 1: Složení zkoušených kaučukových směsí

Směs	Kaučuk	Saze [dsk]
C1	NR+BR+SBR	66
C2	NR+BR+SBR	60
C3	NR+BR+SBR	50
C4	NR+BR+SBR	75
C5	NR+BR	54

5.2 Tahová Zkouška

5.2.1 Podmínky měření a zkušební zařízení

Měření bylo provedeno za třech různých teplot, které byly zajištěny teplotní komorou. Byly to teploty 25 °C, 70 °C a 100 °C.

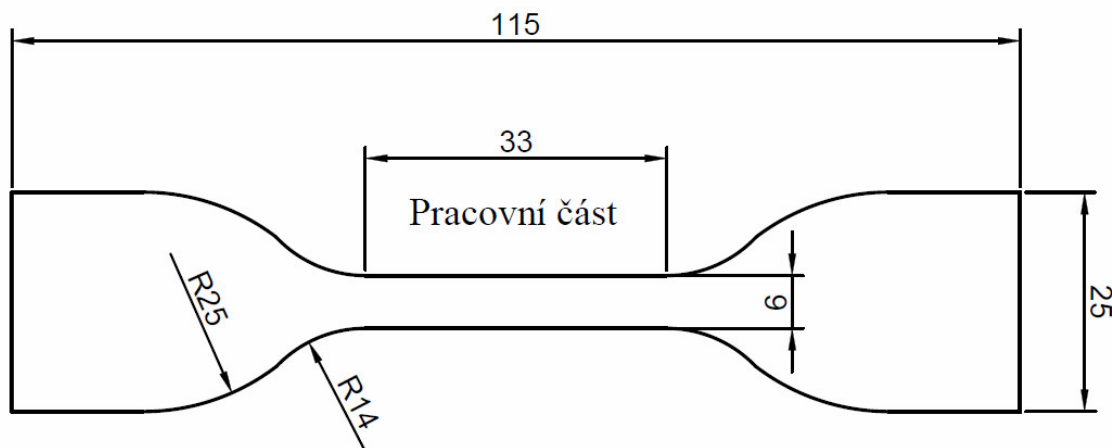
Tahová zkouška se prováděla na trhacím stroji ZWICK, který splňuje normu ISO 7500-1 Třídy 1. Bližší informace o uvedeném zařízení jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Informace o trhacím stroji ZWICK

Název zařízení	ZWICK 1456
Maximální rychlost posuvu	800 mm/min
Maximální možná síla	20 kN
Rozsah teplotní komory	-80 až 250 °C
Počítačový software	testXpertII

5.2.2 Zkušební tělíska

Za pomoci vysekávacího nože, který odpovídal normě ČSN ISO 37, bylo od každé z pěti směsí připraveno 15 vzorků kolmo na směr válcování a 15 vzorků ve stejném směru, jako byl směr válcování (vždy 5 vzorků pro danou teplotu měření). Vyseknuté zkušební tělíska byla tvaru oboustranných lopatek. Rozměry (v milimetrech) a tvar tělíska můžeme vidět na obrázku 10.



Obr. 10: Zkušební tělísko pro tahovou zkoušku

5.2.3 Postup měření

1. Nejdříve byla vysekáním připravena zkušební tělíska (Detailněji popsáno v kapitole 5.2.2)
2. V dalším kroku se v softwaru testXpert II nastavila metoda měření a zadaly se rozměry jednotlivých zkušebních tělísek. Rozměry tělísek se přeměřily za pomoci posuvného měřidla.
3. V teplotní komoře se nastavila požadovaná teplota, na kterou byla zkušební tělíska vyhřátá.
4. Zkušební tělíska se upnula do čelistí trhačího stroje ZWICK 1456.
5. Teplotní komora stroje byla nastavena na danou teplotu, uzavřena a vyčkalo se na teplotu před každým měřením.
6. Po vytemperování komory byl test spuštěn.

7. Testování probíhalo cyklicky. Během prvního cyklu bylo tělísko natahováno do 120% své původní délky, poté bylo odlehčeno a následovalo 3x protažení na 60% své původní délky.
8. Po ukončení testu se tělísko vyjmulo a vyměnilo za další.
9. Měření bylo provedeno za třech odlišných teplot (25 °C, 70 °C, 100 °C)

5.2.4 Zpracování výsledků

Zpracování výsledků se provádělo podle teoretické části (kapitola 4.1). Pro jednotlivou směs se vždy vycházelo z 15 hodnot pro 60% poměrné prodloužení a z 5 hodnot pro 120% poměrné prodloužení. Z hodnot, které byly naměřeny, se zpracovaly výsledky, jež byly zaneseny do tabulek a grafů.

5.3 Zkouška dvouosé napjatosti

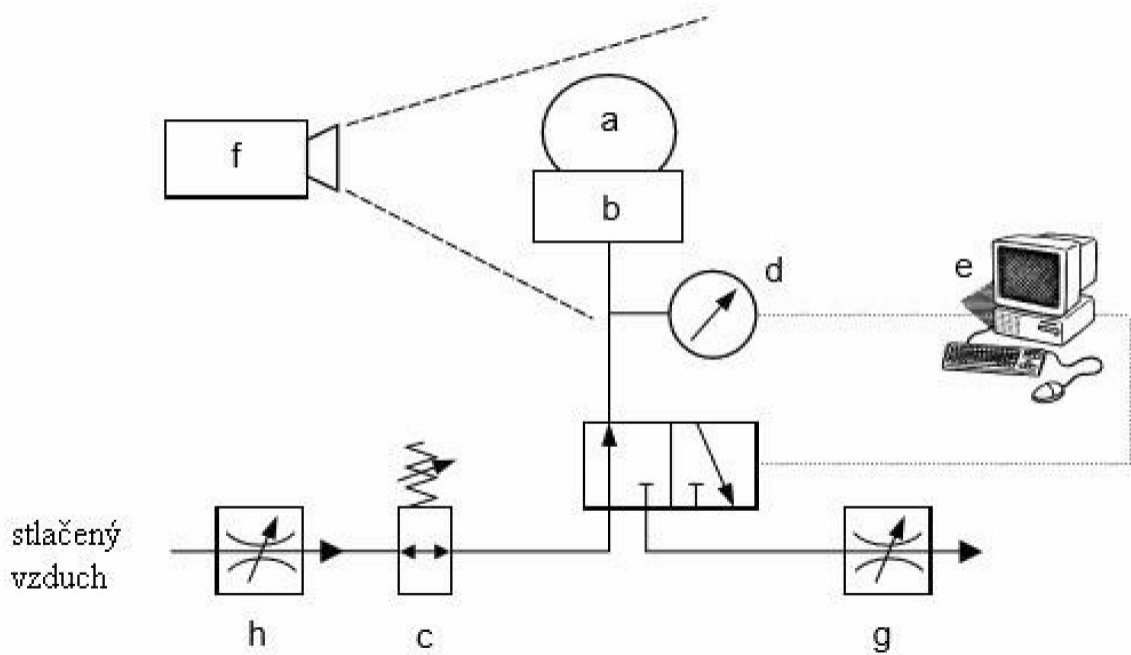
5.3.1 Podmínky měření a zkušební zařízení

Měření bylo prováděno za laboratorních podmínek, při teplotě 24 °C.

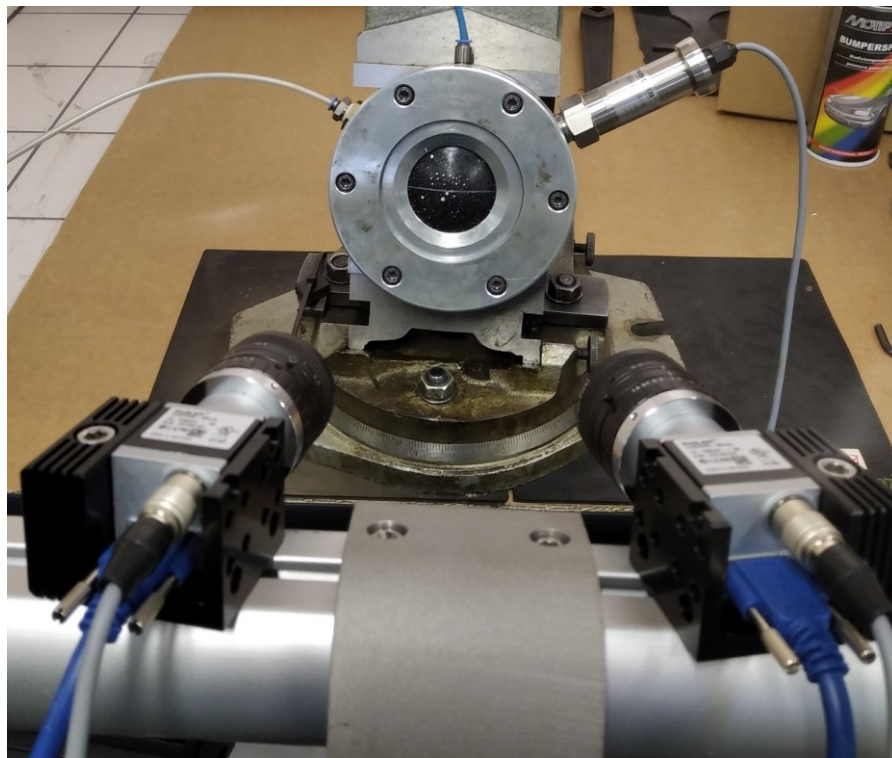
Zkouška dvouosé napjatosti se uskutečňuje na speciálním zařízení, které bylo vyvinuto pro tento typ zkoušky (obrázek 11). Zkušební tělísko je zde upnuto mezi dvěma prstenci. Z jedné strany je přiváděn pod tlakem vzduch, což zapříčiňuje, že se zkušební tělísko nafukuje. Software Mercury RT zajišťuje měření tlaku a pomocí kamer zaznamenává průběh deformace (obrázek 12).

Tabulka 3: Informace o zařízení pro test dvouosé napjatosti

Kamery	Basler
Pracovní rozlišení	5 MPx
Software	Mercury RT
Manometr	BD Sensors DMP 33 li
Manometr - rozsah	0 – 6 bar
Manometr - přesnost	0,125 %FSO



Obr. 11: Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti [18]

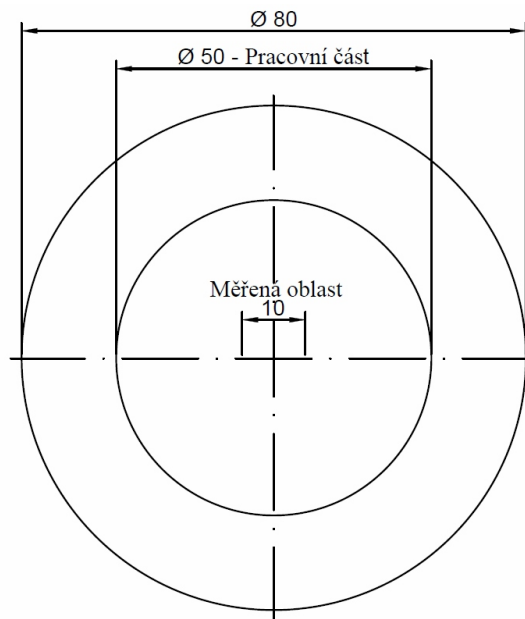


Obr. 12: Upevnění vzorku a nastavení kamer pro zkoušku dvouosé napjatosti

5.3.2 Zkušební tělíska

Zkušební tělíska byla kruhového tvaru o průměru 80 mm. Po upnutí do zkušebního zařízení byla testovaná plocha průměru 50 mm (obrázek 13). Byl použit bílý sprej

k vytvoření skvrnitého vzoru na zkušební tělísku a prostředkem vzorku byla nakreslena čára. Zde byly nastaveny v počítači tři body za účelem výpočtu.



Obr. 13: Zkušební tělísko pro dvouosou napjatost

5.3.3 Postup měření

1. Nejdříve byla vyseknuta zkušební tělíska, pro každou ze směsí 5 kusů.
2. Každé zkušební tělísko bylo opatřeno bílou čarou vedenou středem a byl na něj nastříkán sprejem skvrnitý vzor.
3. Tělíska se upnulo do zkušebního zařízení.
4. Následovalo nastavení kamer, musely být zaostřeny a zkalibrovány pro správné snímání celého průběhu zkoušky.
5. V počítači byla v softwaru Mercury RT navolena měřicí metoda, která se spustila. Na tělísku se nastavily tři body, jež vytvořily trojúhelník. Za jejich pomoci byl zjišťován poloměr kružnice opsané a délka oblouku kružnice opsané.
6. Pomalu se přidával tlak, zkušební tělíska byla nafukována až do poměrného prodloužení 60% a následně opět pomalu vyfukována.

5.3.4 Zpracování výsledků

Zpracování výsledků se provádělo podle teoretické části (kapitola 4.2). Za pomoci softwaru Mercury RT bylo vypočítáno napětí a poměrné prodloužení. Zjištěné hodnoty byly zaznamenány do tabulek a grafů.

5.4 Zkouška čistým smykem

5.4.1 Podmínky měření a zkušební zařízení

Měření bylo prováděno za laboratorních podmínek, při teplotě 24 °C.

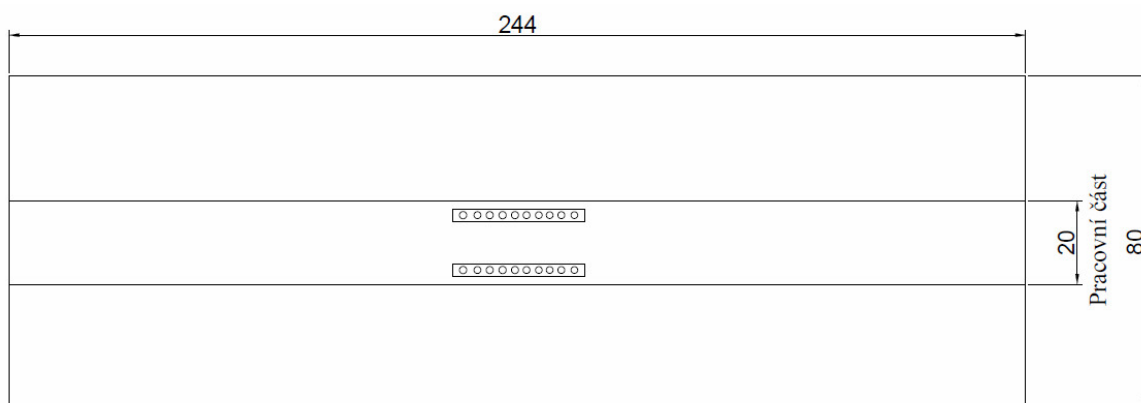
Zkušebním zařízením u této zkoušky byl stroj SHIMADZU AGS, jenž splňuje normu ISO 7500-1 Třídy 1.

Tabulka 4: Informace o zařízení pro zkoušku čistým smykem

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

5.4.2 Zkušební tělíska

Bylo připraveno 10 zkušebních tělísek ve tvaru obdélníku z každé směsi. Vždy se jednalo o 5 zkušebních tělísek příčně a 5 podélně vzhledem na směr válcování materiálu. Tělíska měly rozměry 244mm x 80 mm a jejich tloušťka byla v rozmezí 2,4 mm až 3,3 mm. Tělíska se uchytila za spodní a horní okraj do čelistí zkušebního stroje a před zahájením zkoušky se na tělíska umístily značky za účelem snímání posunutí digitální kamerou stroje.



Obr. 14: Zkušební tělíska pro zkoušku čistým smykem

5.4.3 Postup měření

1. Nejdříve se nastříhaly zkušební tělíska daných rozměrů (podrobněji popsáno v kapitole 5.4.2)
2. V softwaru TRAPEZIUM se poté nastavila zkouška čistým smykem a metoda měření. U každého zkušebního tělíska se před zahájením zkoušky změřila posuvným měřidlem tloušťka a zadaly se rozměry.
3. Zkušební tělíska se uchytilo do čelistí trhacího stroje (SHIMADZU AGS - 50kNXD), umístily se značky, které následně byly snímány za pomoci digitální kamery a vyhodnocovalo se tak protažení tělíska.
4. Dále se spustil test a tělíska se začalo natahovat. Rychlost natahování byla zvolena na 20 mm/min.
5. Při dosažení potřebné hodnoty poměrného protažení se test ukončil.
6. Zkušební tělíska se vyjmulo ze stroje a upevnilo se další.

5.4.4 Zpracování výsledků

Zpracování výsledků se provádělo podle teoretické části (kapitola 4.3). Z hodnot, které byly naměřeny (průřez, síla, původní délka a měřená délka pracovní oblasti zkušebního tělesa) se vypočítalo napětí a poměrné prodloužení. Vypočítané hodnoty byly zaneseny do tabulek a grafů.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

6.1 Materiál C1

Jedná se o směs kaučuků NR+BR+SBR, obsah sazí: 66 dsk

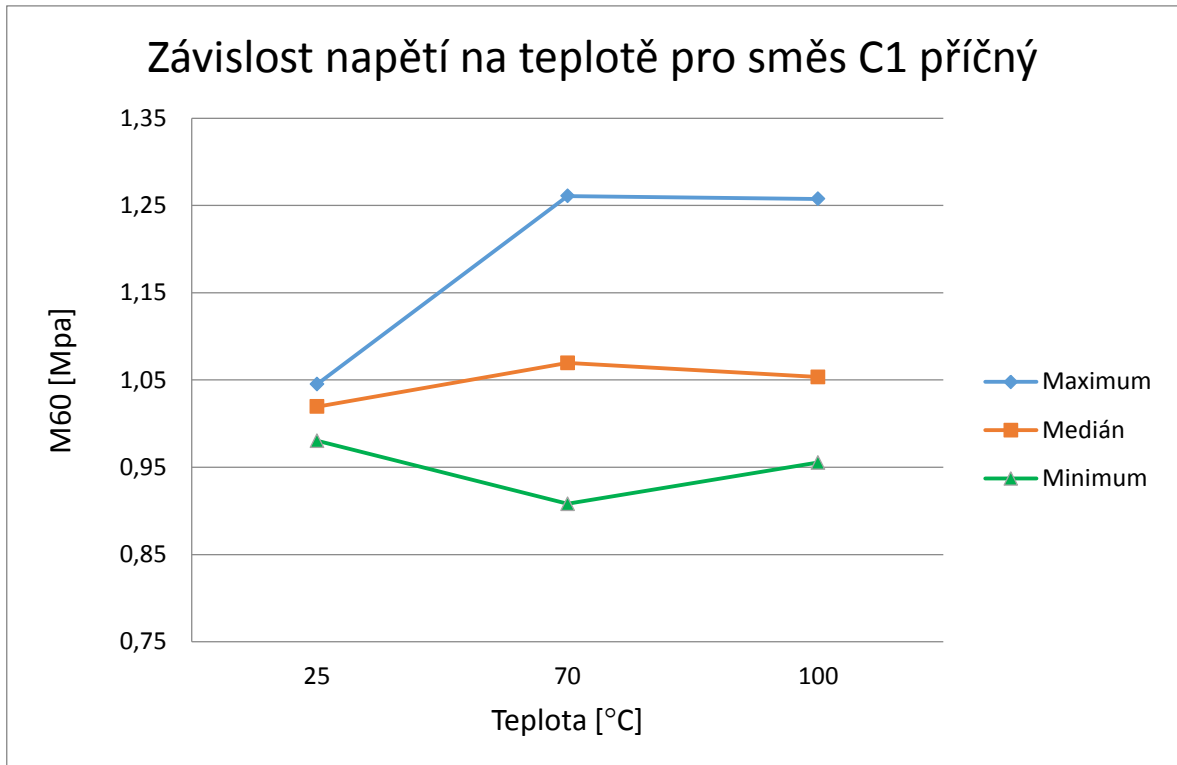
6.1.1 Tahová zkouška

Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C1

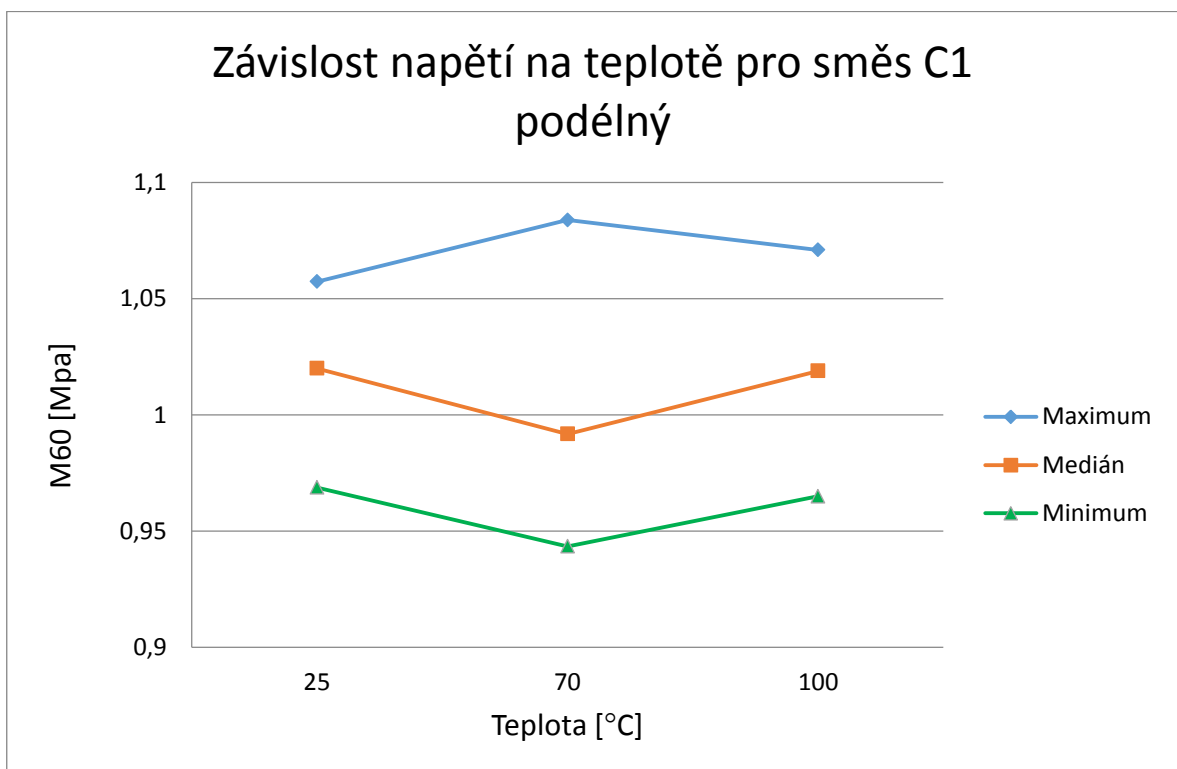
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	1,05	0,98	1,02
C1 podélný	1,06	0,97	1,02
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	1,26	0,91	1,07
C1 podélný	1,08	0,94	0,99
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	1,26	0,96	1,05
C1 podélný	1,07	0,96	1,02

Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C1

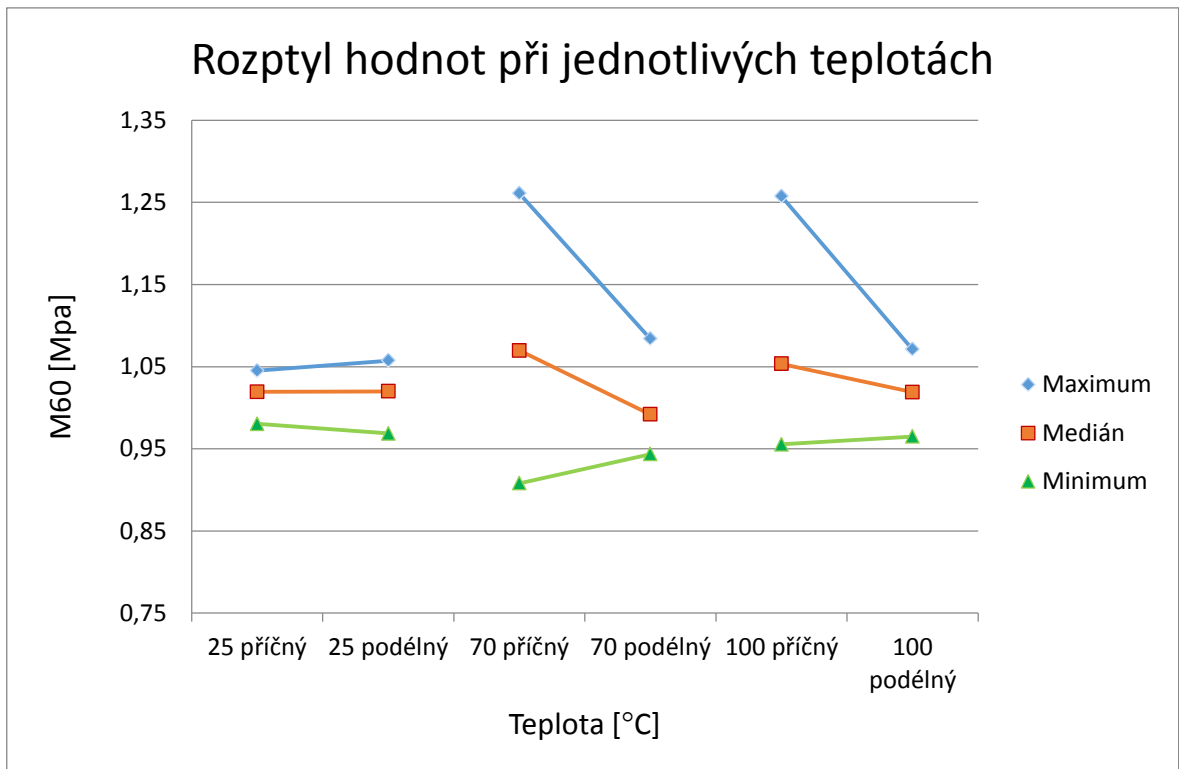
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	2,23	2,06	2,18
C1 podélný	2,17	2,09	2,10
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	2,20	1,72	1,88
C1 podélný	1,88	1,80	1,85
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	2,42	1,99	2,11
C1 podélný	2,12	2,02	2,04



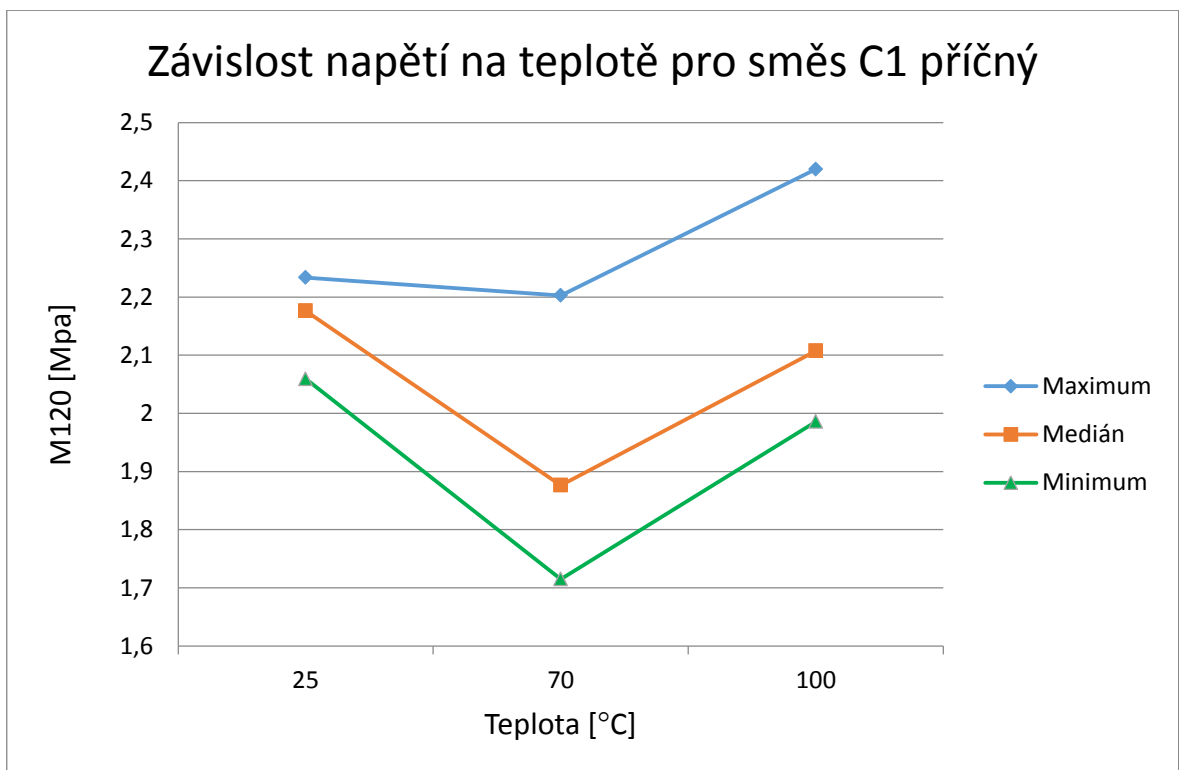
Obr. 15: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%



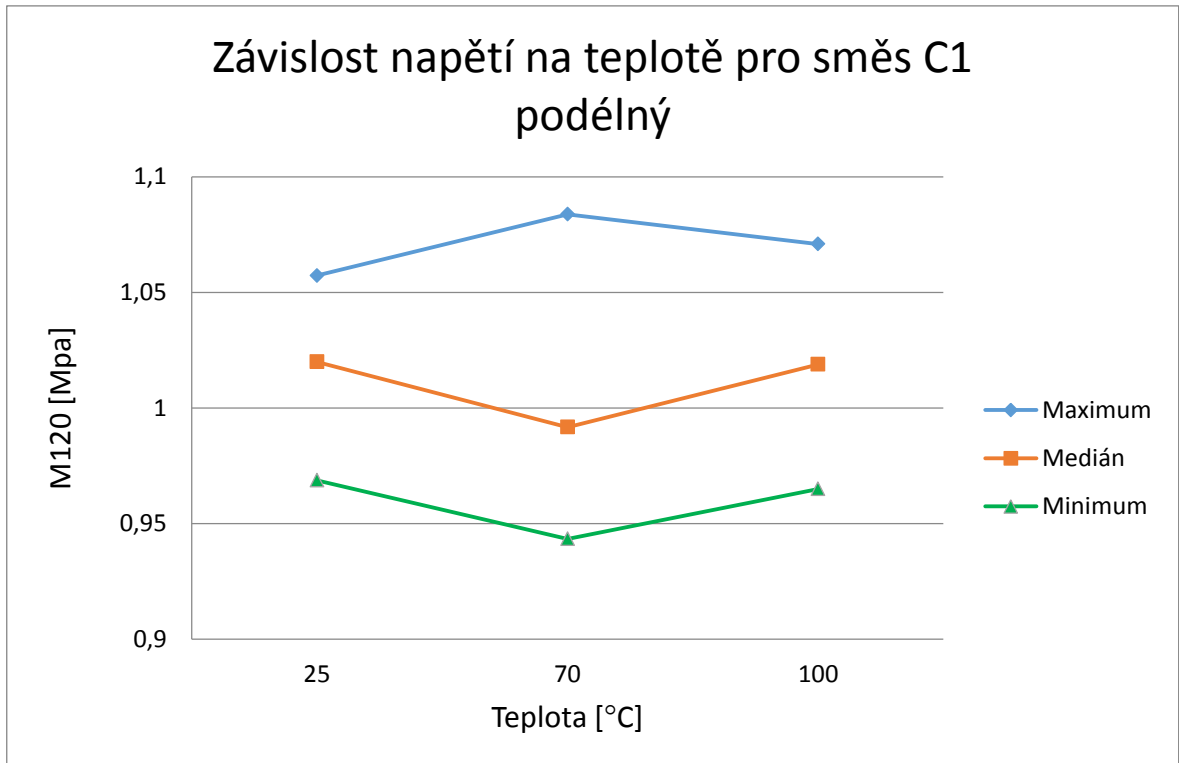
Obr. 16: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%



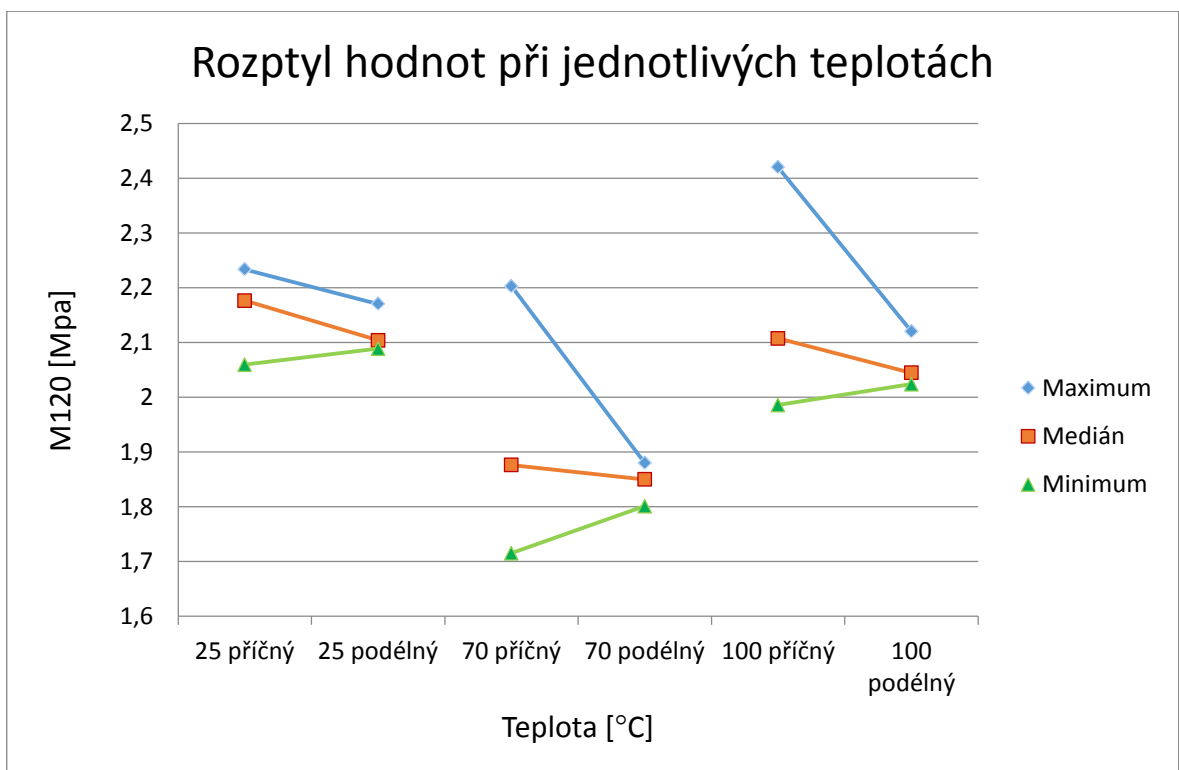
Obr. 17: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C1 při poměrném prodloužení 60%



Obr. 18: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 19: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 20: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C1 při poměrném prodloužení 120%

6.1.2 Zkouška dvouosé napjatosti

Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C1

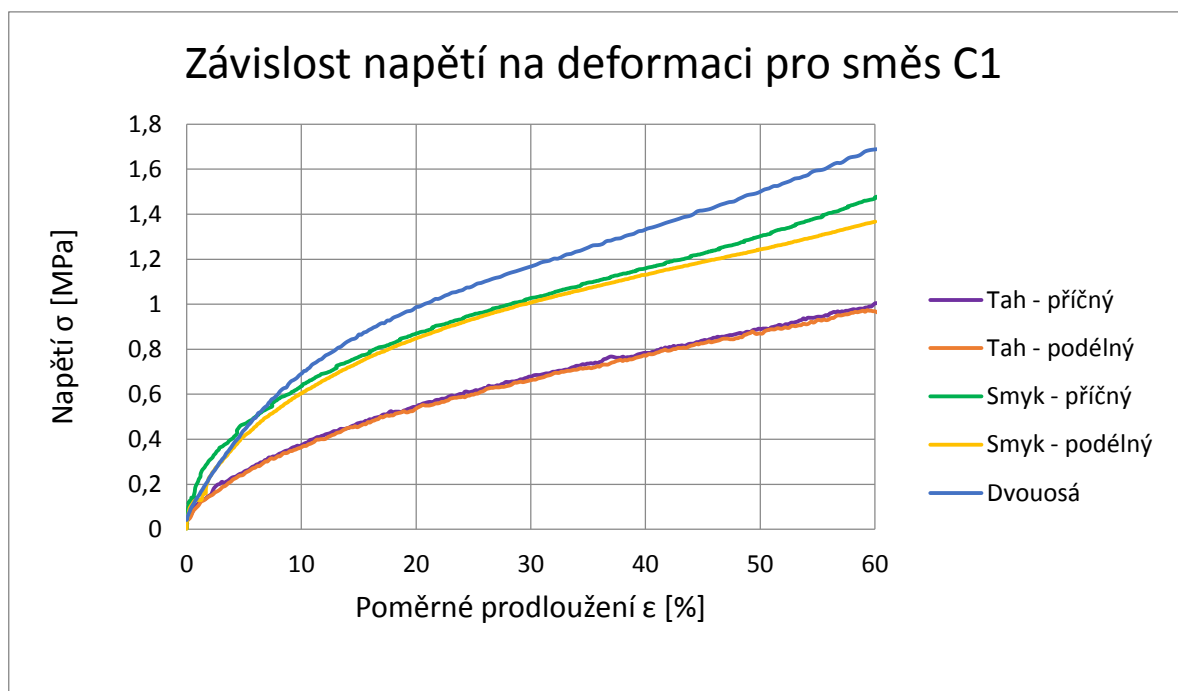
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1	1,29	0,98	1,14
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1	1,88	1,56	1,66

6.1.3 Zkouška Čistým smykem

Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C1

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C1 příčný	1,26	1,01	1,19
C1 podélný	1,04	0,99	1,02
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
C1 příčný	1,66	1,40	1,49
C1 podélný	1,47	1,37	1,38

6.1.4 Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení



Obr. 21: Graf porovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C1

6.2 Materiál C2

Jedná se o směs kaučuků NR+BR+SBR, obsah sazí: 60 dsk

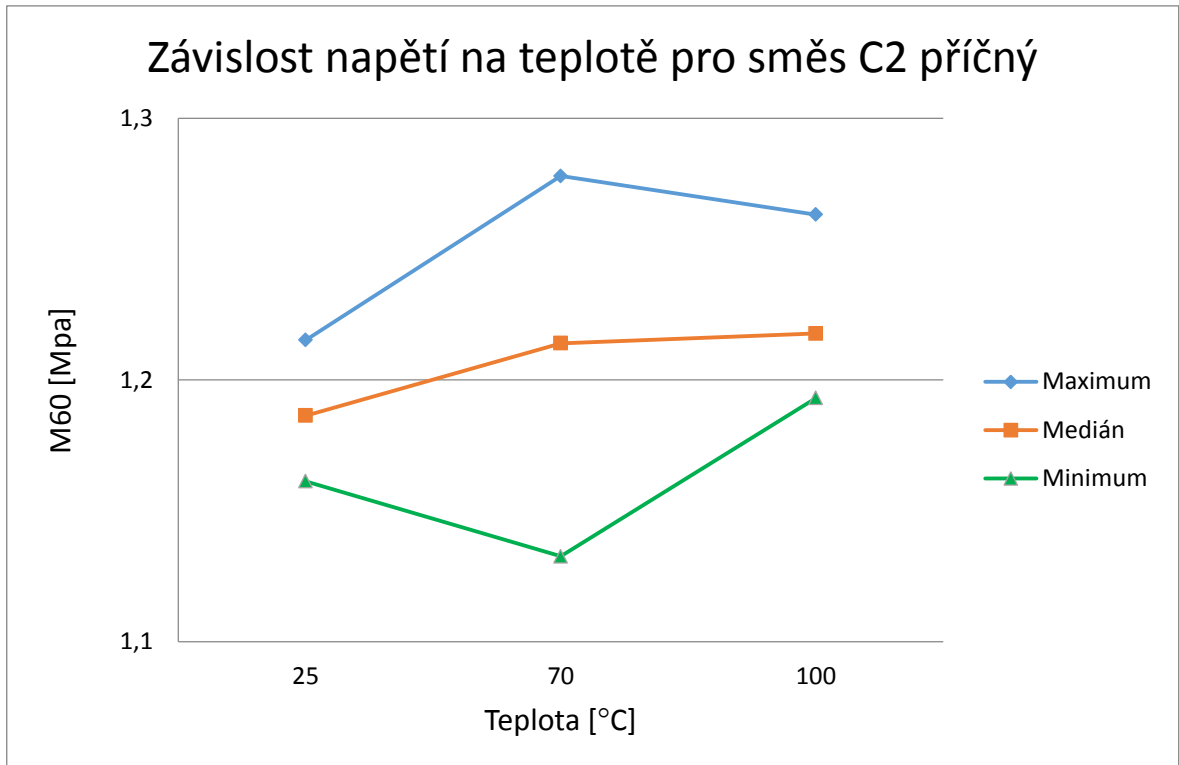
6.2.1 Tahová zkouška

Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C2

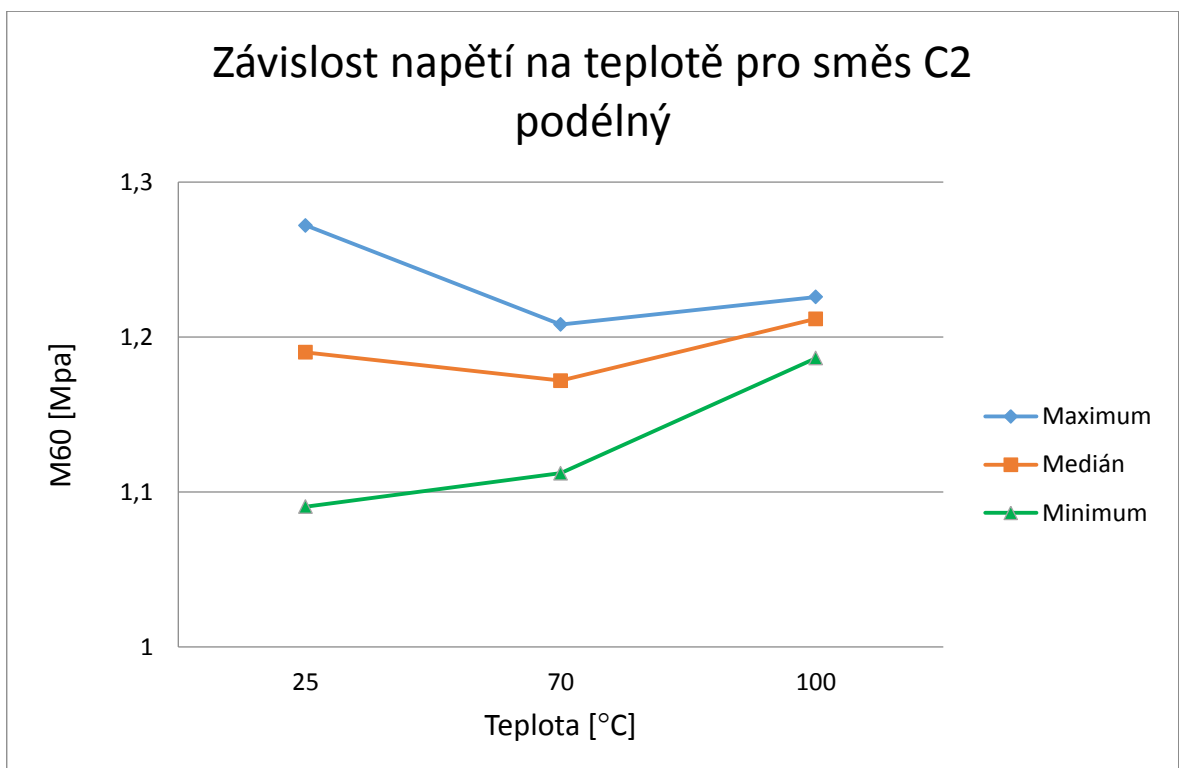
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	1,22	1,16	1,19
C2 podélný	1,27	1,09	1,19
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	1,28	1,13	1,21
C2 podélný	1,21	1,11	1,17
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	1,26	1,19	1,22
C2 podélný	1,23	1,19	1,21

Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C2

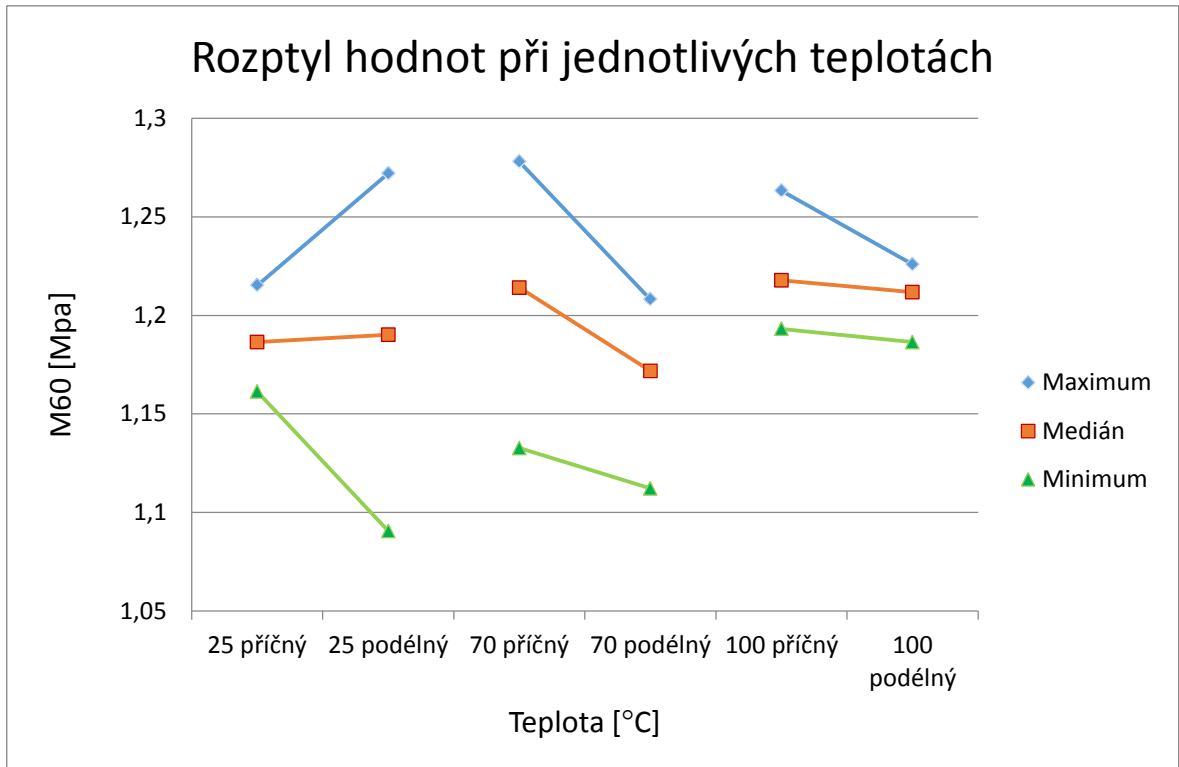
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	2,23	2,06	2,18
C2 podélný	2,17	2,09	2,10
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	2,20	1,72	1,88
C2 podélný	1,88	1,80	1,85
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	2,42	1,99	2,11
C2 podélný	2,12	2,02	2,04



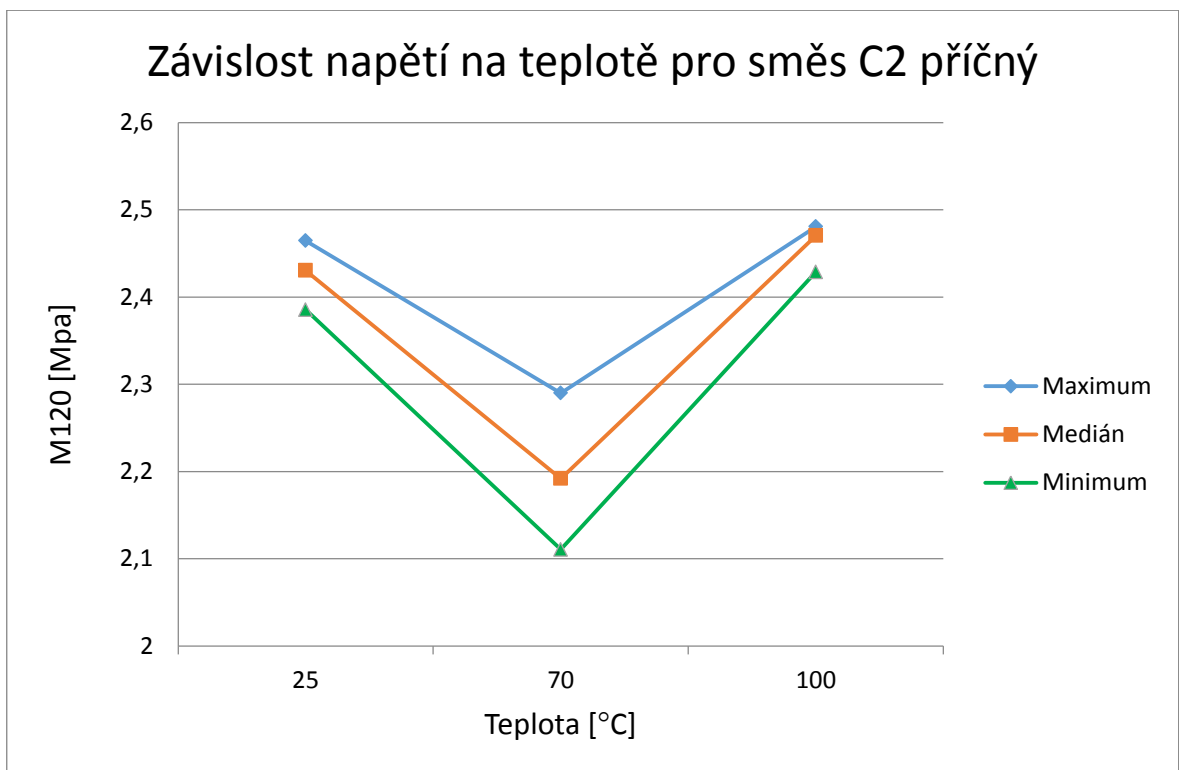
Obr. 22: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C2 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%



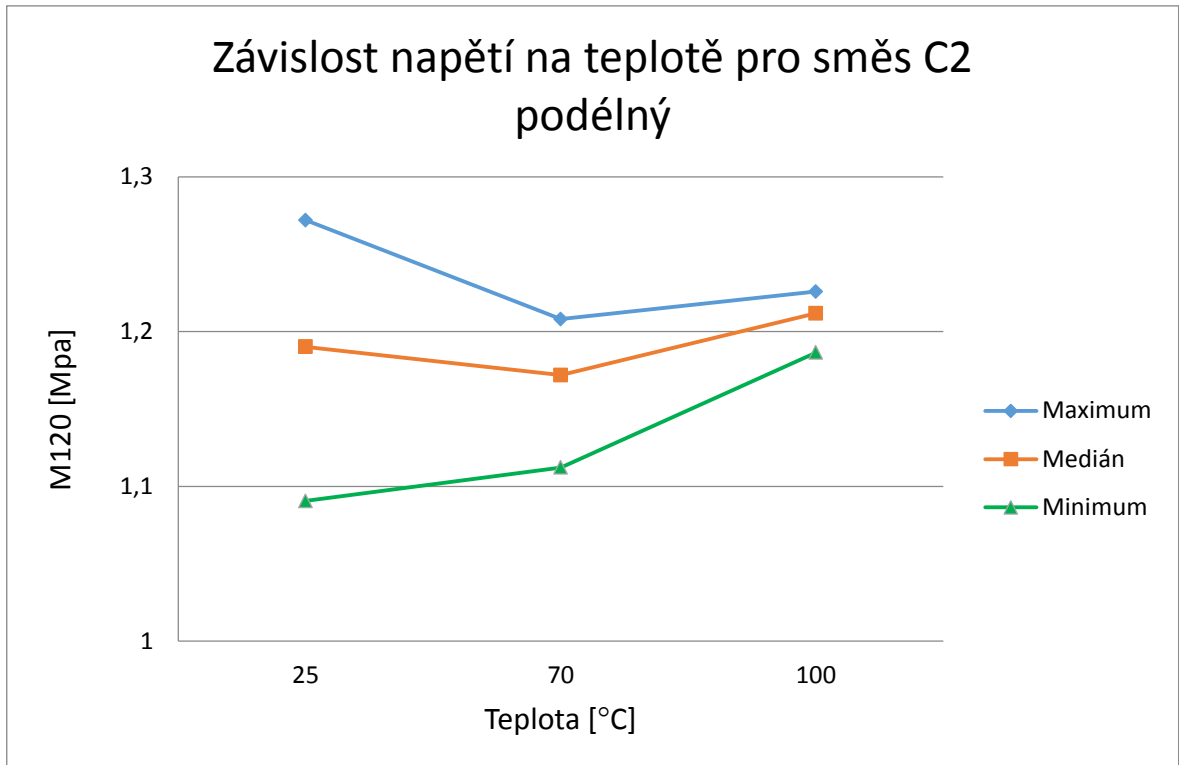
Obr. 23: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C2 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%



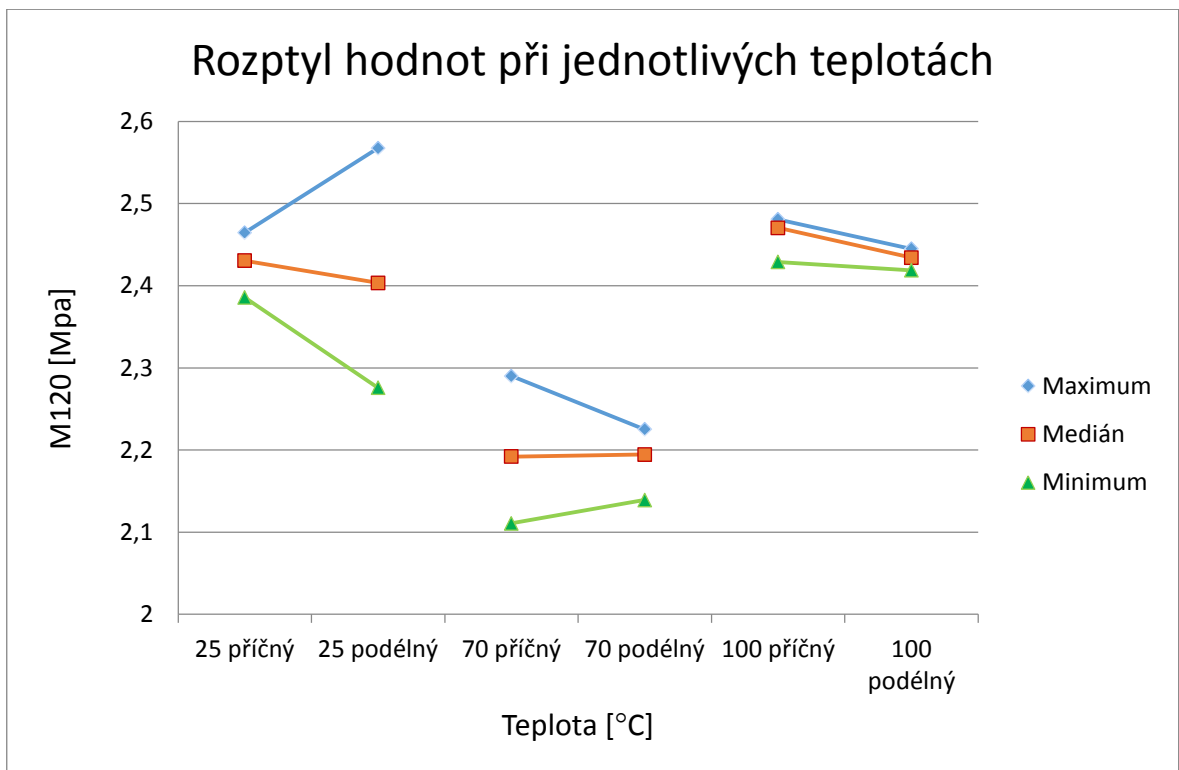
Obr. 24: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C2 při poměrném prodloužení 60%



Obr. 25: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C2 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 26: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C2 při poměrném prodloužení 120%



Obr. 27: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C2 při poměrném prodloužení 120%

6.2.2 Zkouška dvouosé napjatosti

Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C2

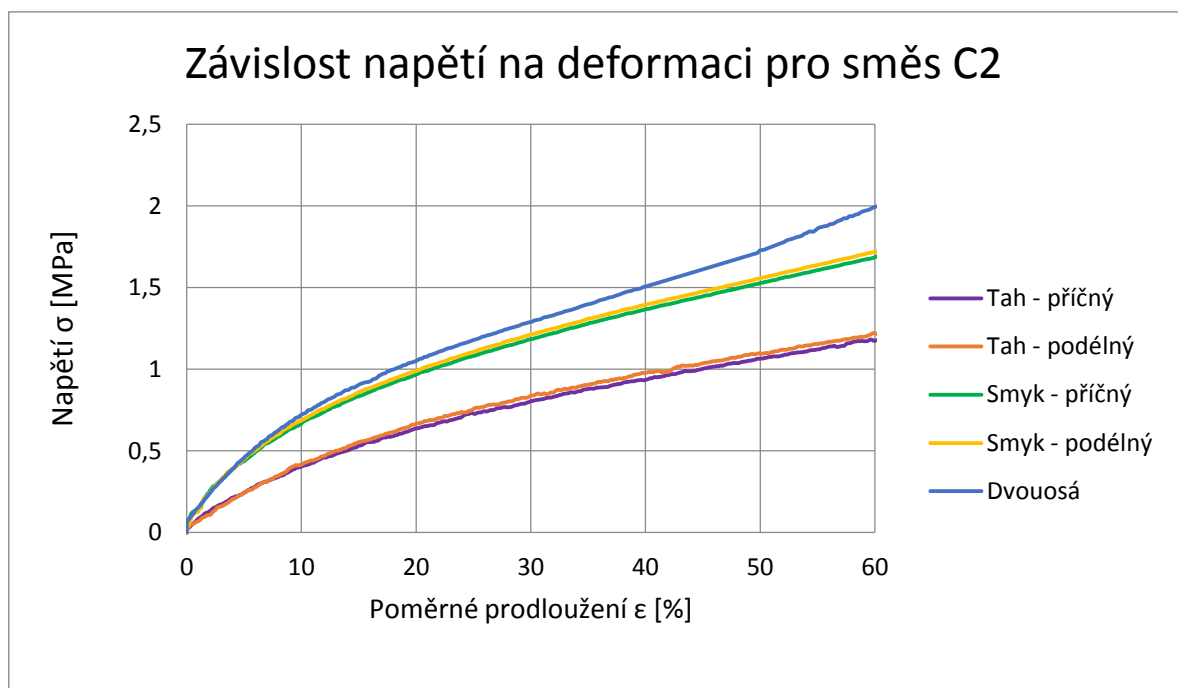
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2	1,35	1,01	1,14
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2	2,03	1,59	1,78

6.2.3 Zkouška čistým smykem

Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C2

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C2 příčný	1,27	1,17	1,23
C2 podélný	1,26	1,21	1,23
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
C2 příčný	1,82	1,65	1,69
C2 podélný	1,78	1,70	1,72

6.2.4 Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení



Obr. 28: Graf porovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C2

6.3 Materiál C3

Jedná se o směs kaučuků NR+BR+SBR, obsah sazí: 50 dsk

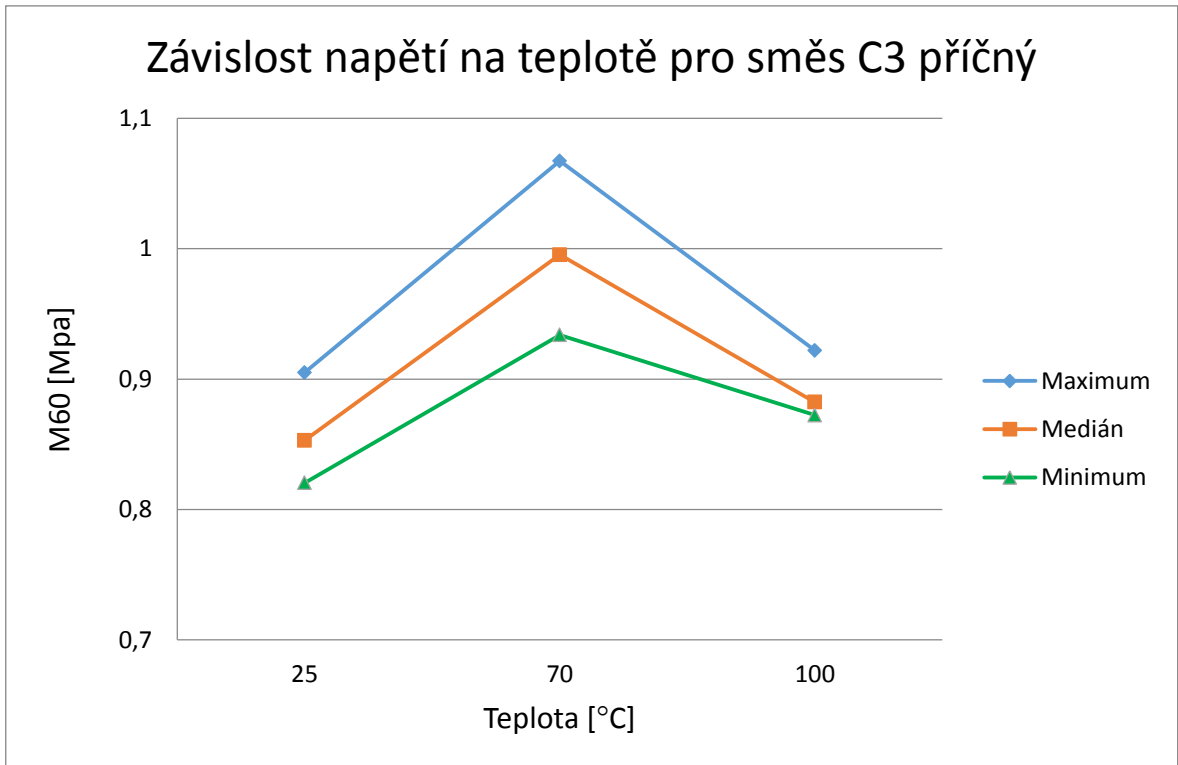
6.3.1 Tahová zkouška

Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C3

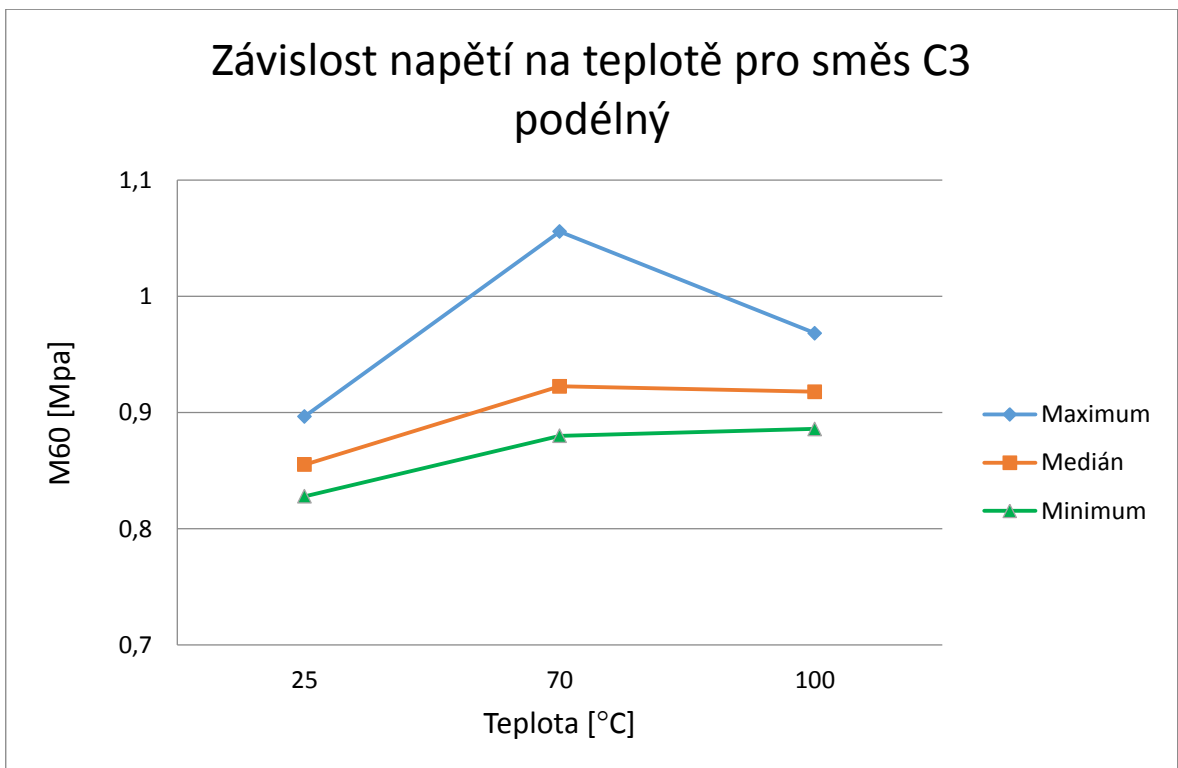
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	0,90	0,82	0,85
C3 podélný	0,90	0,83	0,86
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	1,07	0,93	1,00
C3 podélný	1,06	0,88	0,92
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	0,92	0,87	0,88
C3 podélný	0,97	0,89	0,92

Tabulka 14: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C3

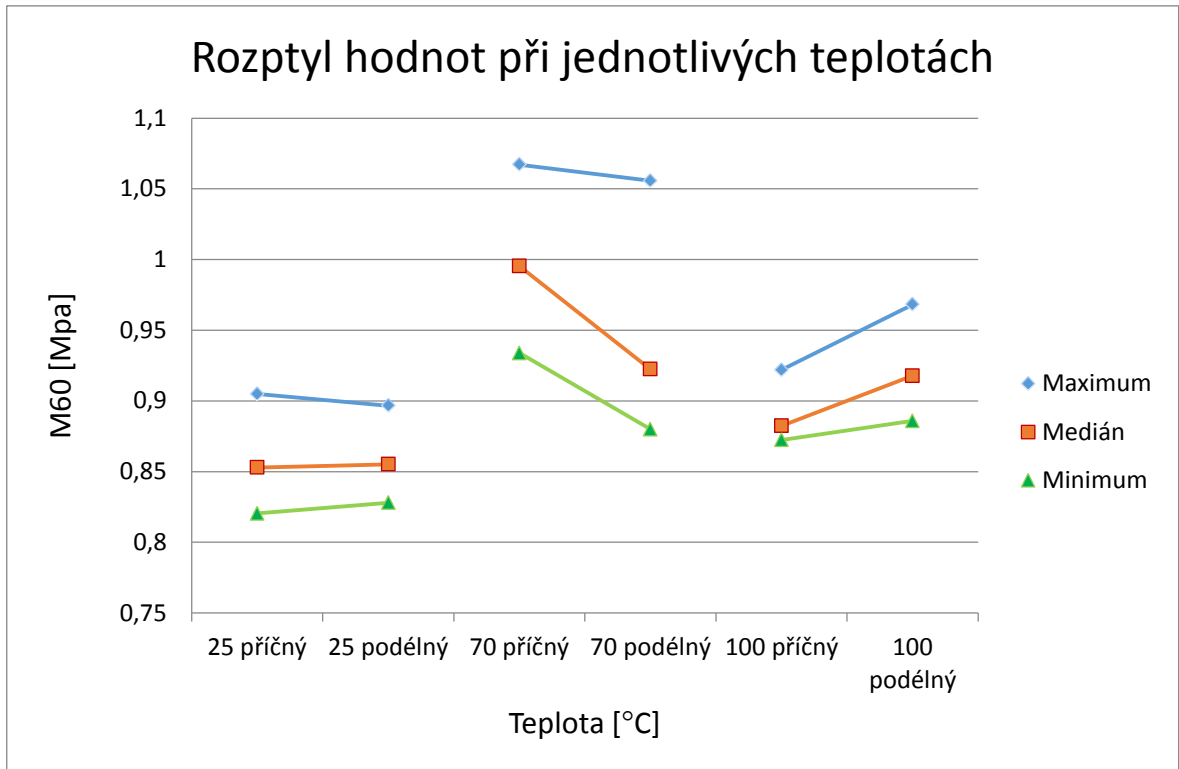
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	2,46	2,39	2,43
C3 podélný	2,57	2,28	2,40
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	2,29	2,11	2,19
C3 podélný	2,23	2,14	2,19
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	2,48	2,43	2,47
C3 podélný	2,44	2,42	2,43



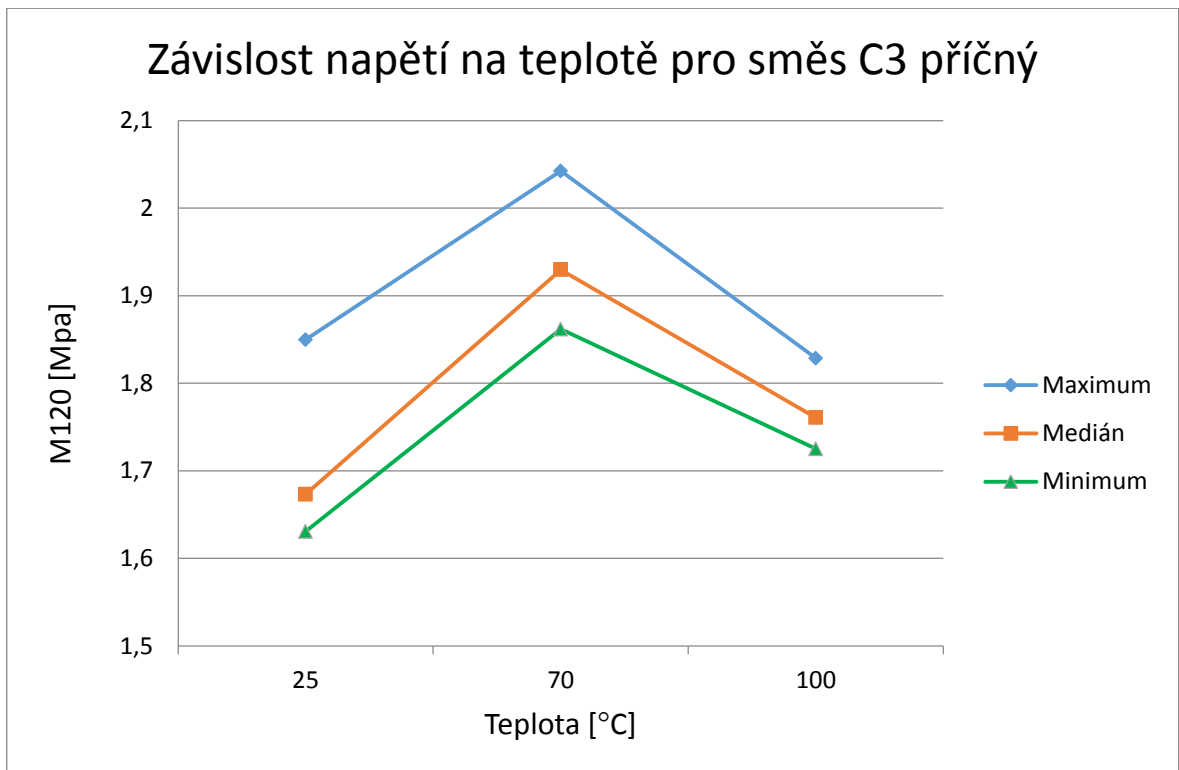
Obr. 29: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%



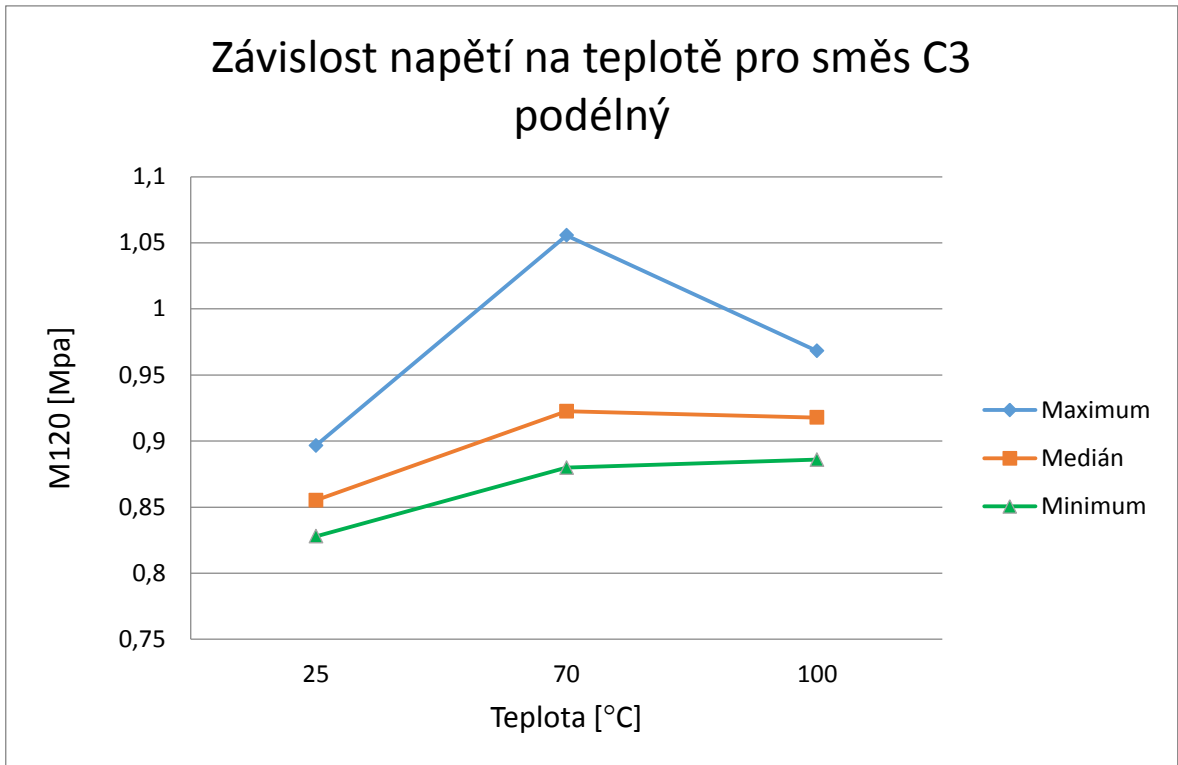
Obr. 30: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%



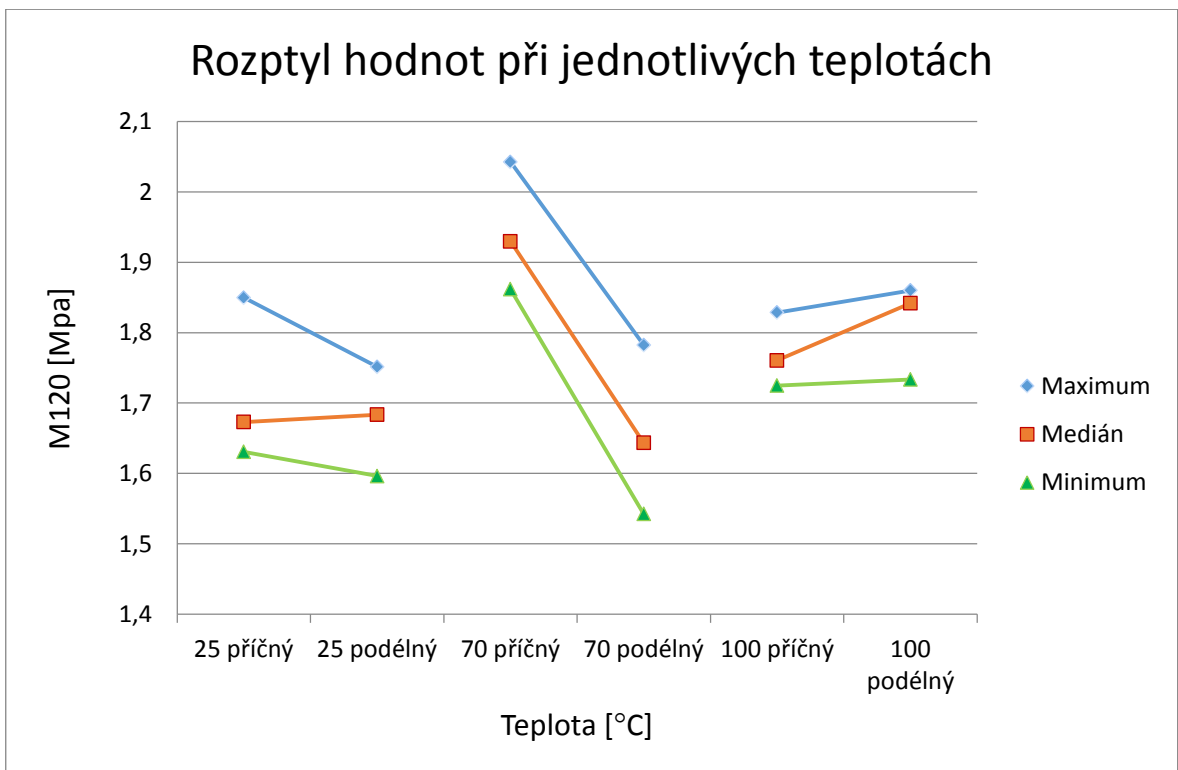
Obr. 31: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C3 při poměrném prodloužení 60%



Obr. 32: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 33: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 34: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C3 při poměrném prodloužení 120%

6.3.2 Zkouška dvouosé napjatosti

Tabulka 15: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C3

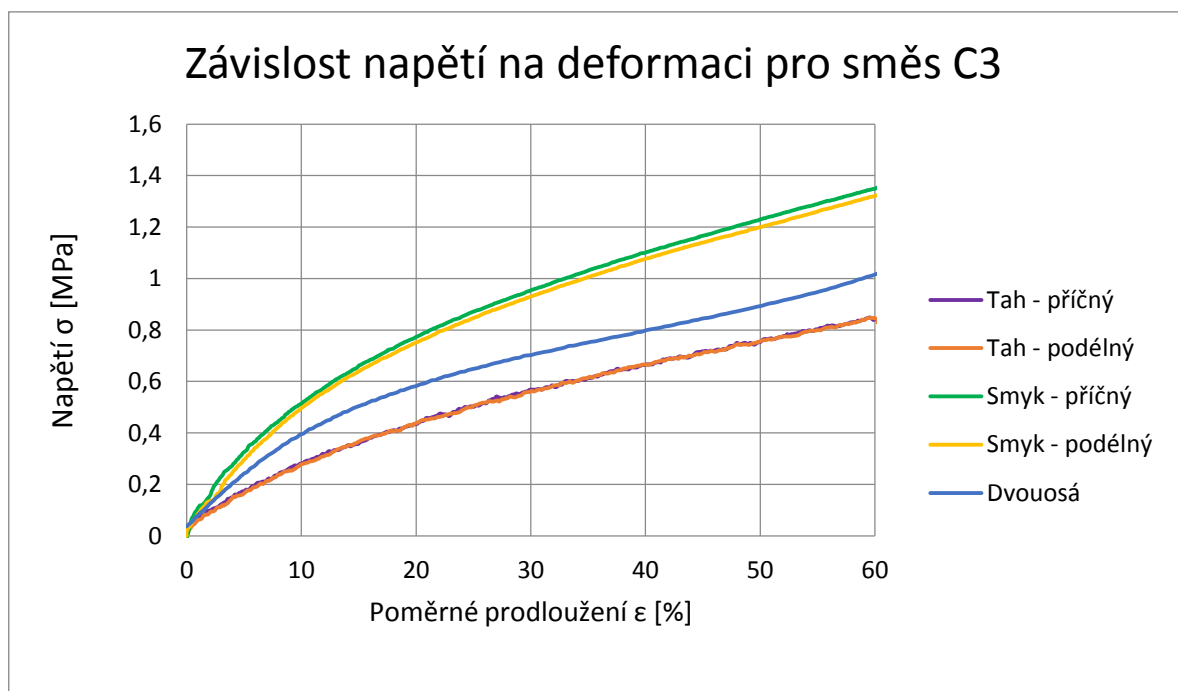
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3	0,85	0,68	0,71
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3	1,23	0,98	1,02

6.3.3 Zkouška čistým smykem

Tabulka 16: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C3

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C3 příčný	0,96	0,88	0,91
C3 podélný	0,93	0,84	0,91
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60 \%$ [MPa]			
C3 příčný	1,36	1,25	1,28
C3 podélný	1,32	1,18	1,30

6.3.4 Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení



Obr. 35: Graf porovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C3

6.4 Materiál C4

Jedná se o směs kaučuků NR+BR+SBR, obsah sazí: 75 dsk

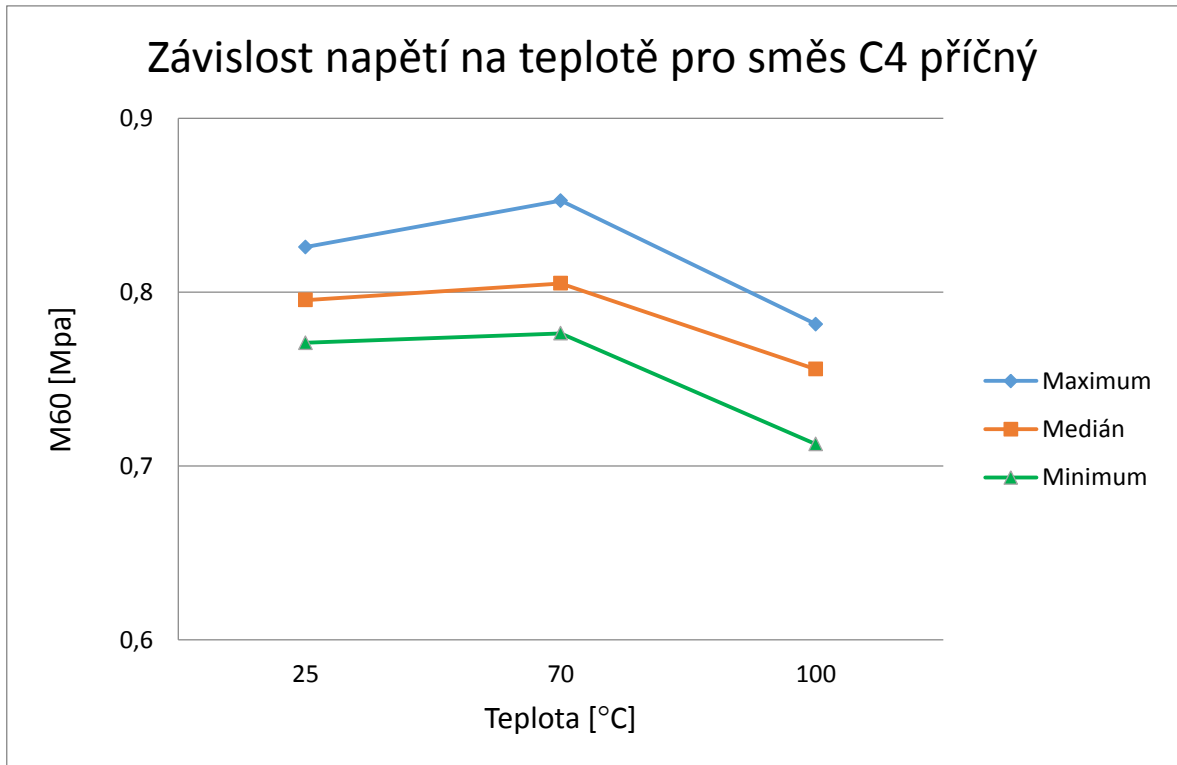
6.4.1 Tahová zkouška

Tabulka 17: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C4

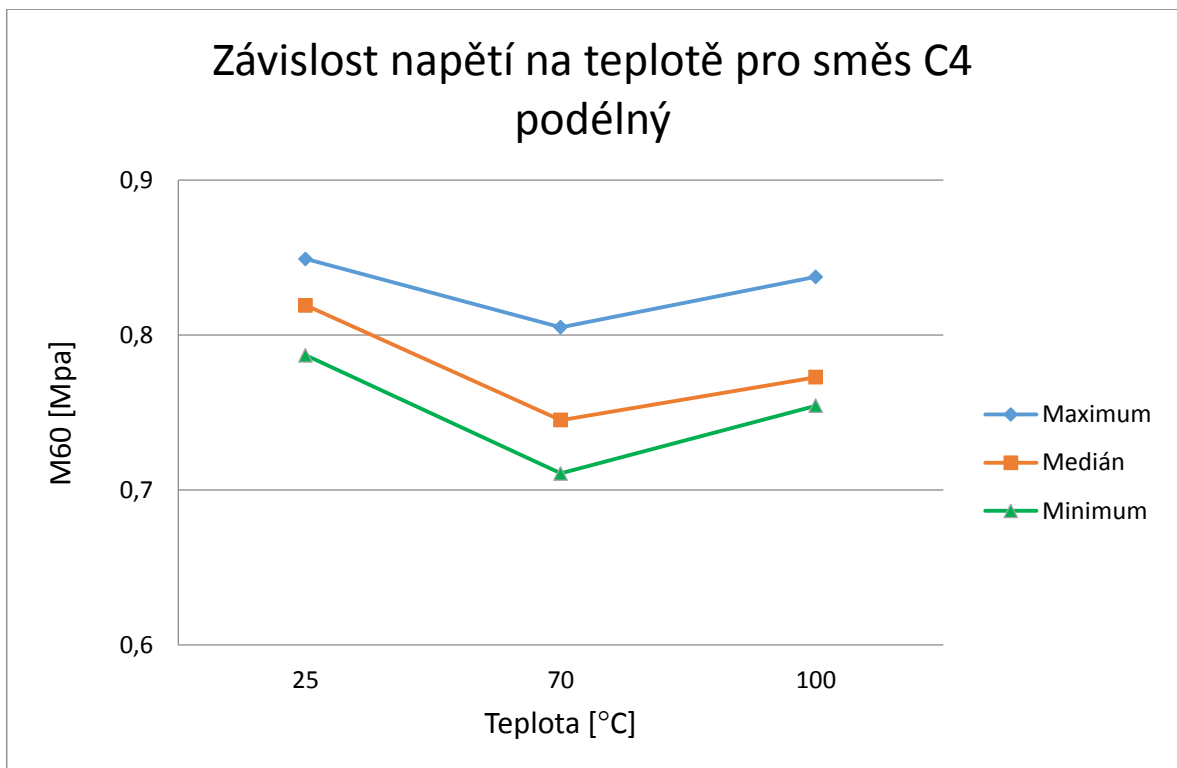
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	0,83	0,77	0,80
C4 podélný	0,85	0,79	0,82
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	0,85	0,78	0,80
C4 podélný	0,80	0,71	0,75
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	0,78	0,71	0,76
C4 podélný	0,84	0,75	0,77

Tabulka 18: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C4

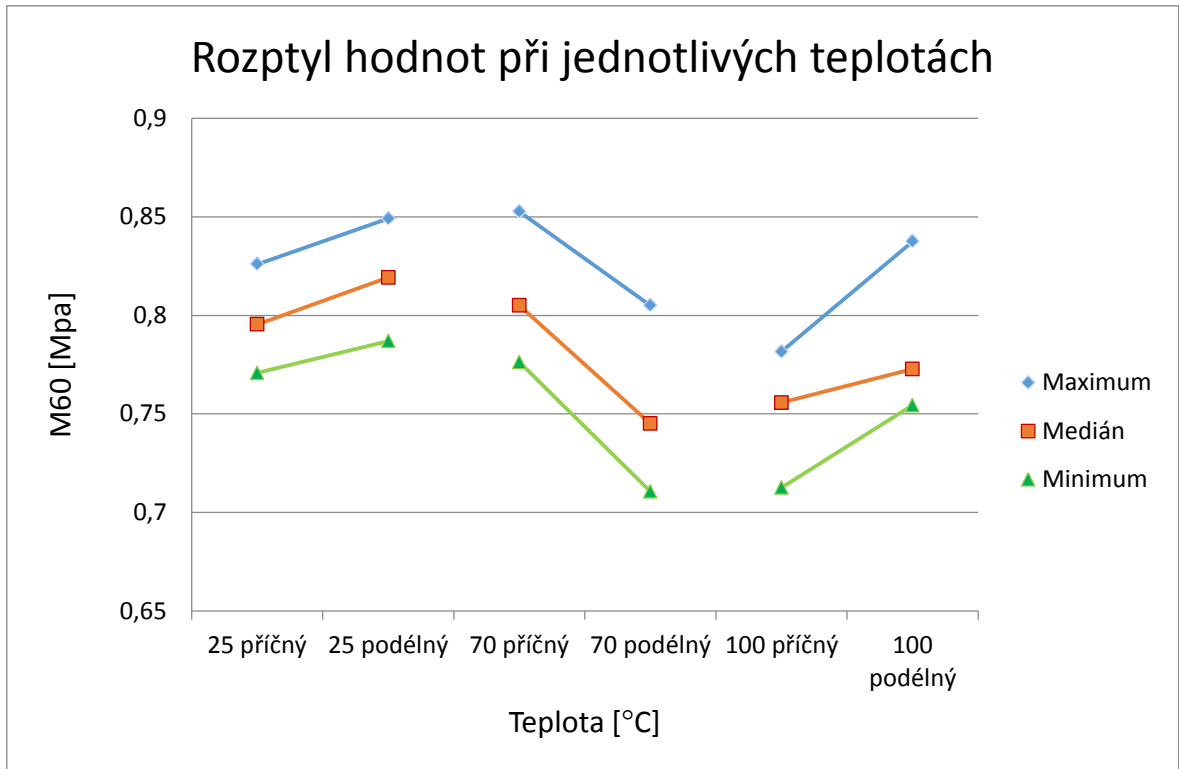
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	1,79	1,61	1,67
C4 podélný	1,92	1,73	1,86
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	1,69	1,63	1,66
C4 podélný	1,74	1,64	1,68
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	1,62	1,49	1,56
C4 podélný	1,79	1,67	1,74



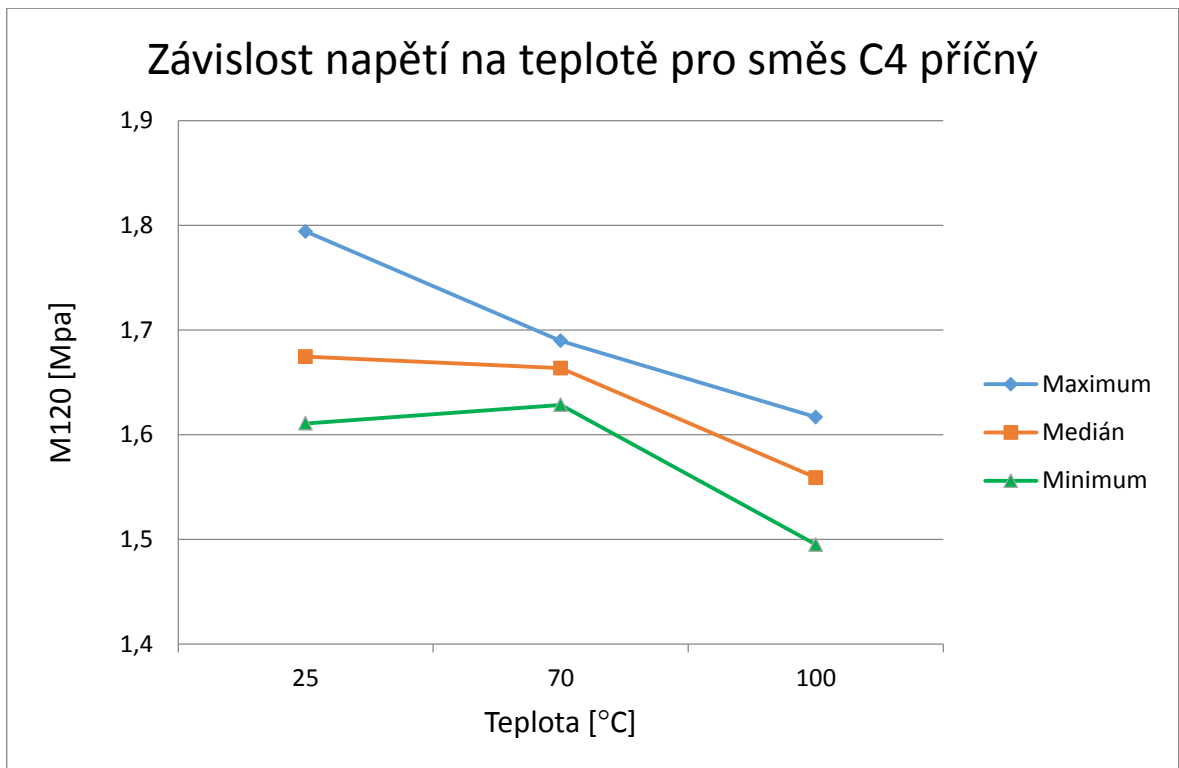
Obr. 36: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%



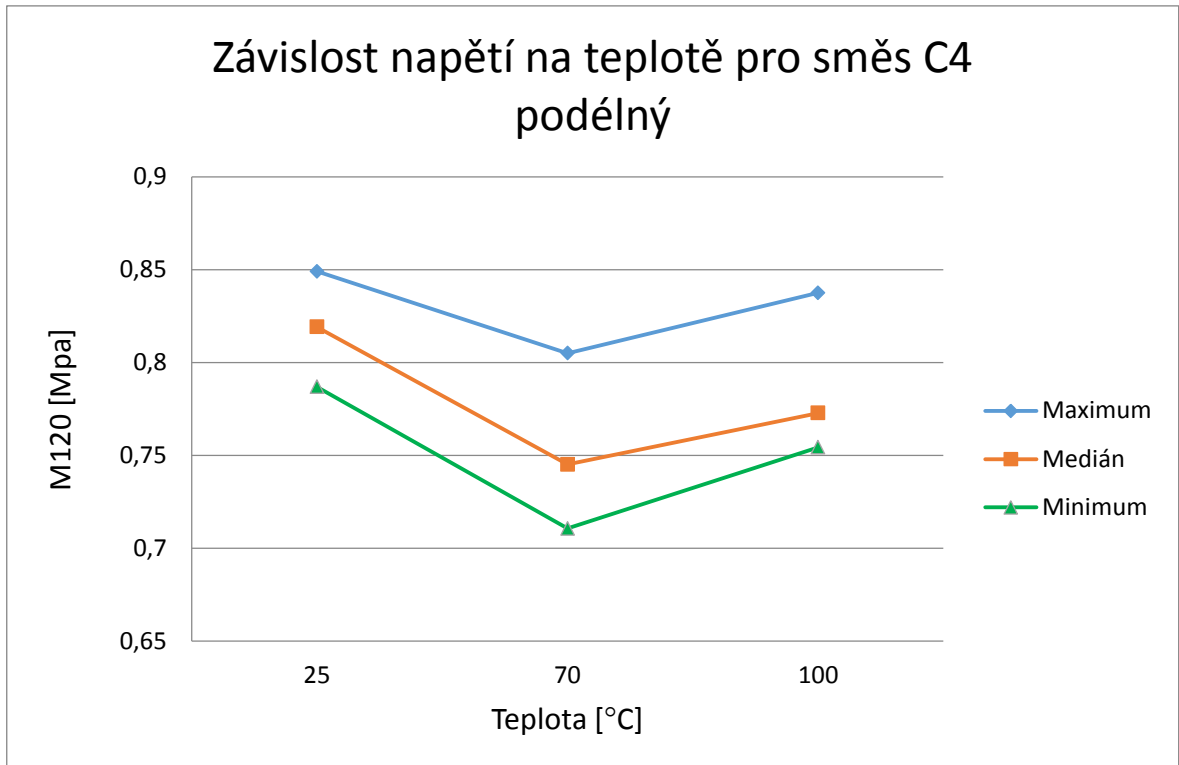
Obr. 37: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%



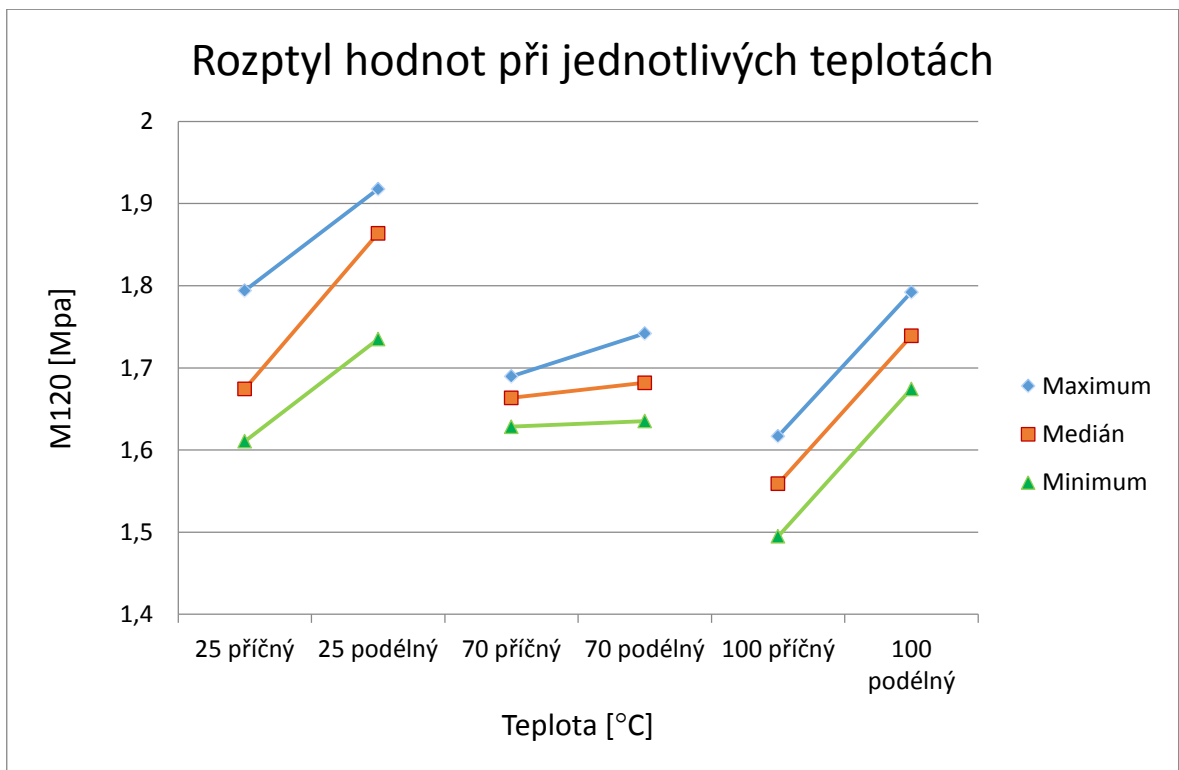
Obr. 38: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C4 při poměrném prodloužení 60%



Obr. 39: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 40: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 41: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C4 při poměrném prodloužení 120%

6.4.2 Zkouška dvouosé napjatosti

Tabulka 19: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C4

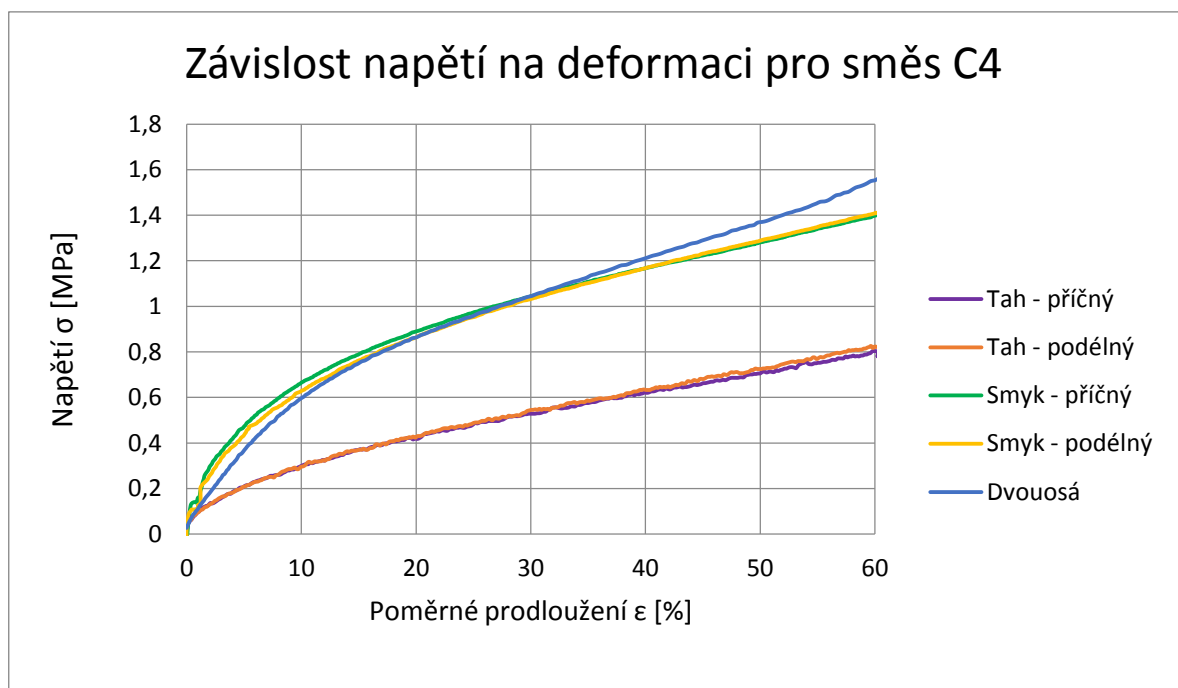
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4	1,06	0,97	1,05
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4	1,58	1,43	1,54

6.4.3 Zkouška čistým smykem

Tabulka 20: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C4

Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C4 příčný	1,07	0,98	1,04
C4 podélný	1,11	0,88	1,03
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
C4 příčný	1,44	1,33	1,40
C4 podélný	1,49	1,35	1,37

6.4.4 Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení



Obr. 42: Graf porovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C4

6.5 Materiál C5

Jedná se o směs kaučuků NR+BR, obsah sazí: 54 dsk

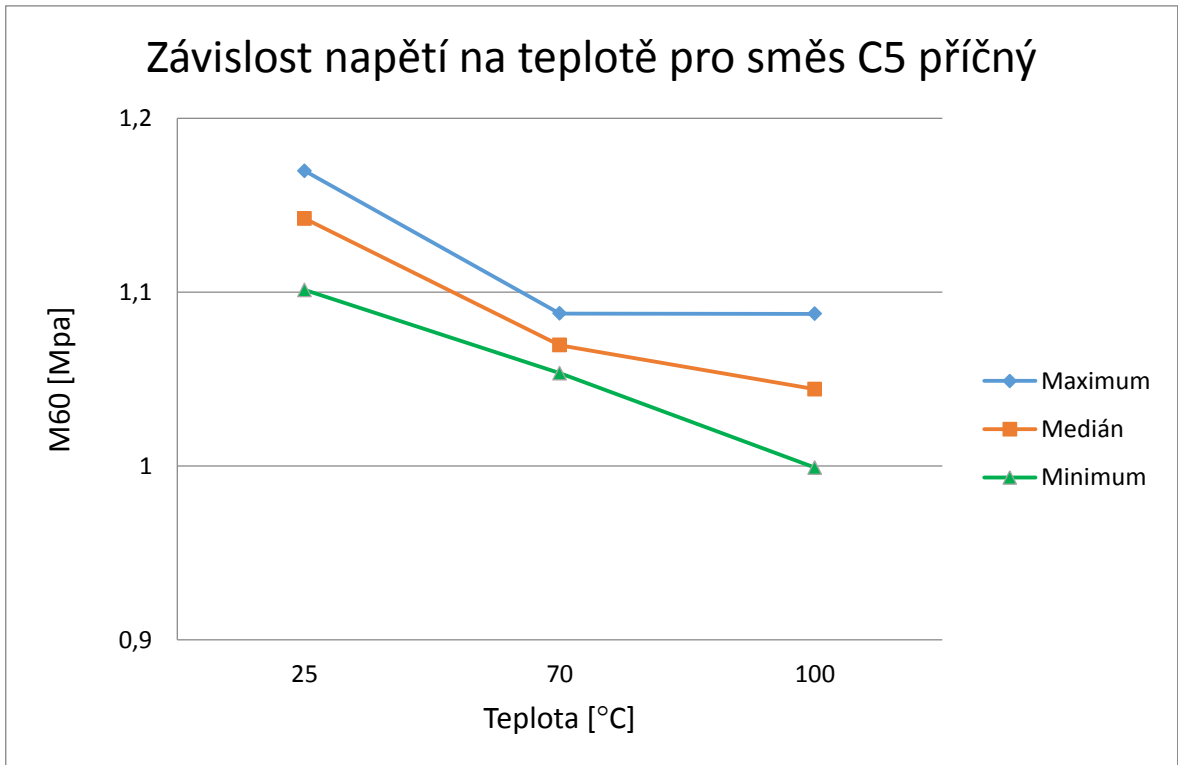
6.5.1 Tahová zkouška

Tabulka 21: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C5

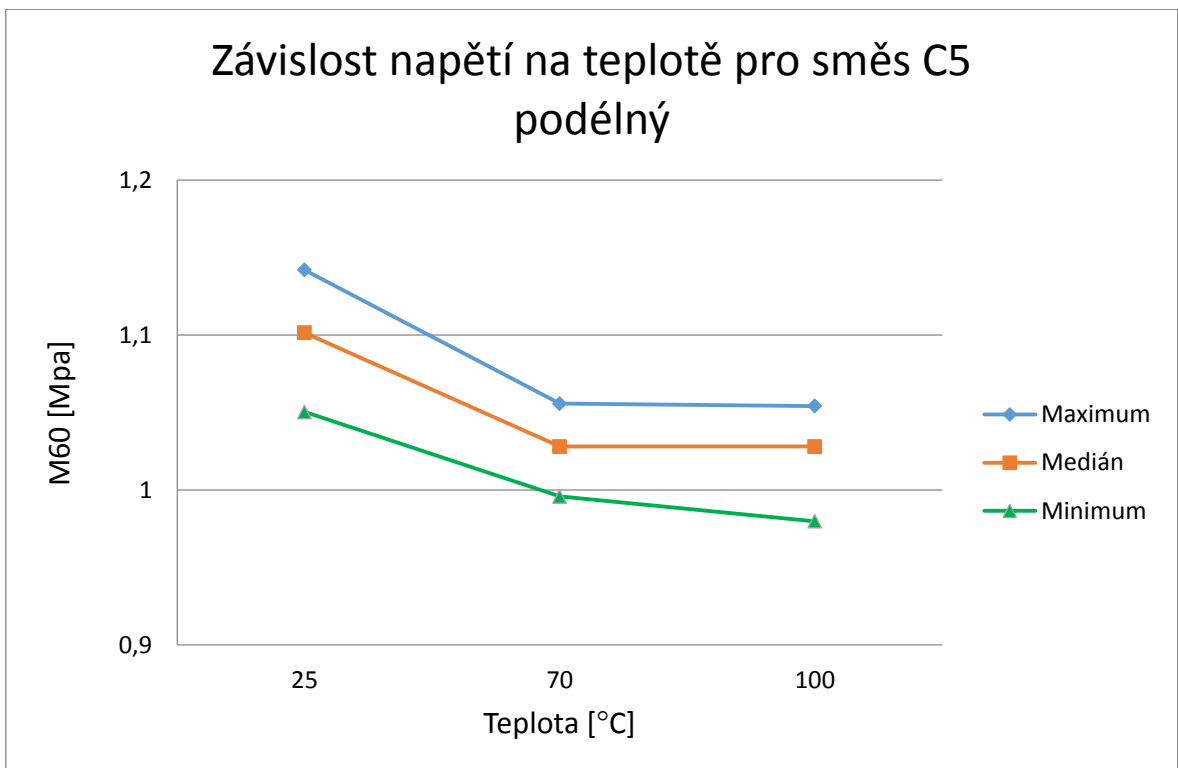
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	1,17	1,10	1,14
C5 podélný	1,14	1,05	1,10
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	1,09	1,05	1,07
C5 podélný	1,06	1,00	1,03
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	1,09	1,00	1,04
C5 podélný	1,05	0,98	1,03

Tabulka 22: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C5

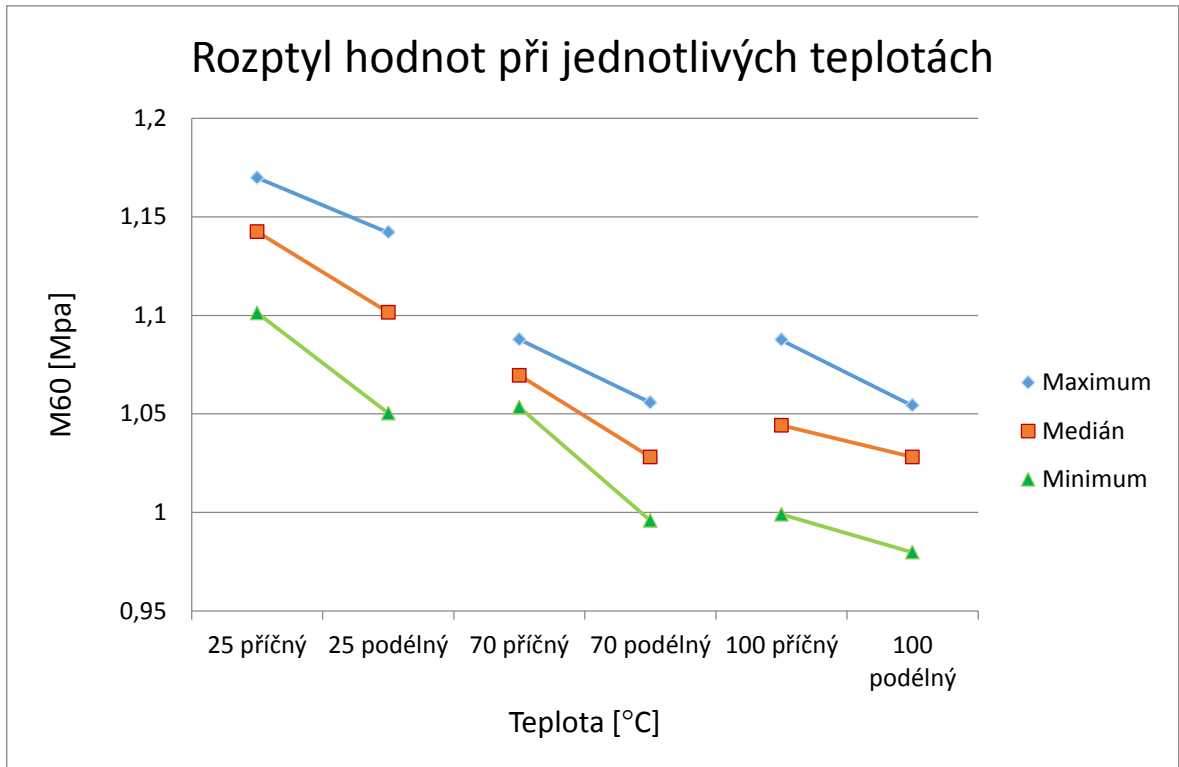
Napětí σ při teplotě 25 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	2,46	2,23	2,30
C5 podélný	2,41	2,01	2,09
Napětí σ při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	2,11	2,03	2,08
C5 podélný	2,03	1,93	2,01
Napětí σ při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\varepsilon = 120\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	2,03	1,96	1,98
C5 podélný	2,03	1,89	1,91



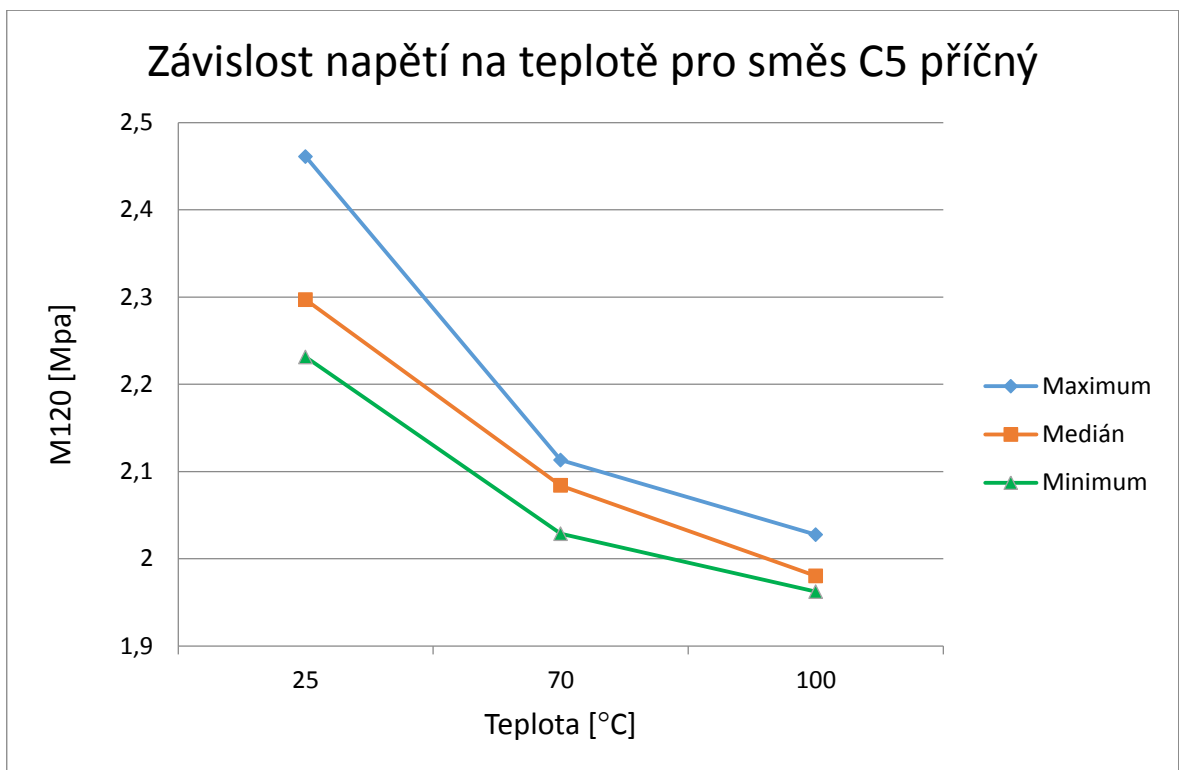
Obr. 43: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%



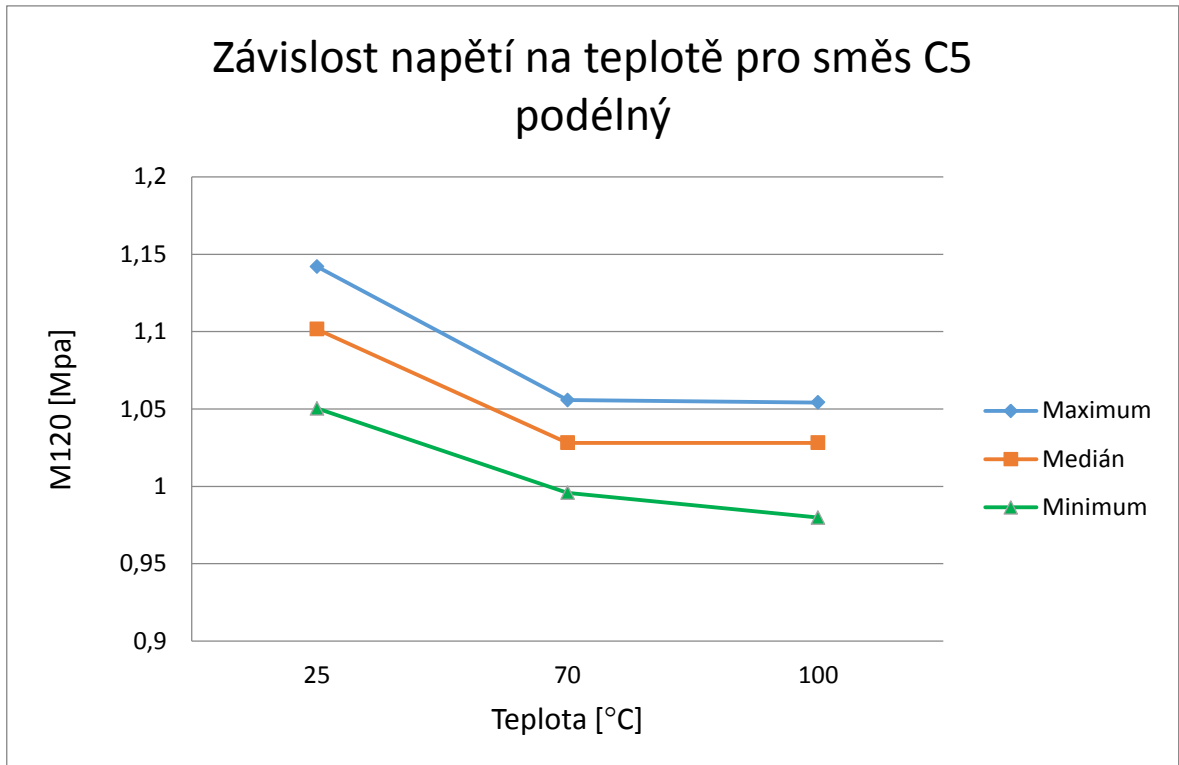
Obr. 44: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%



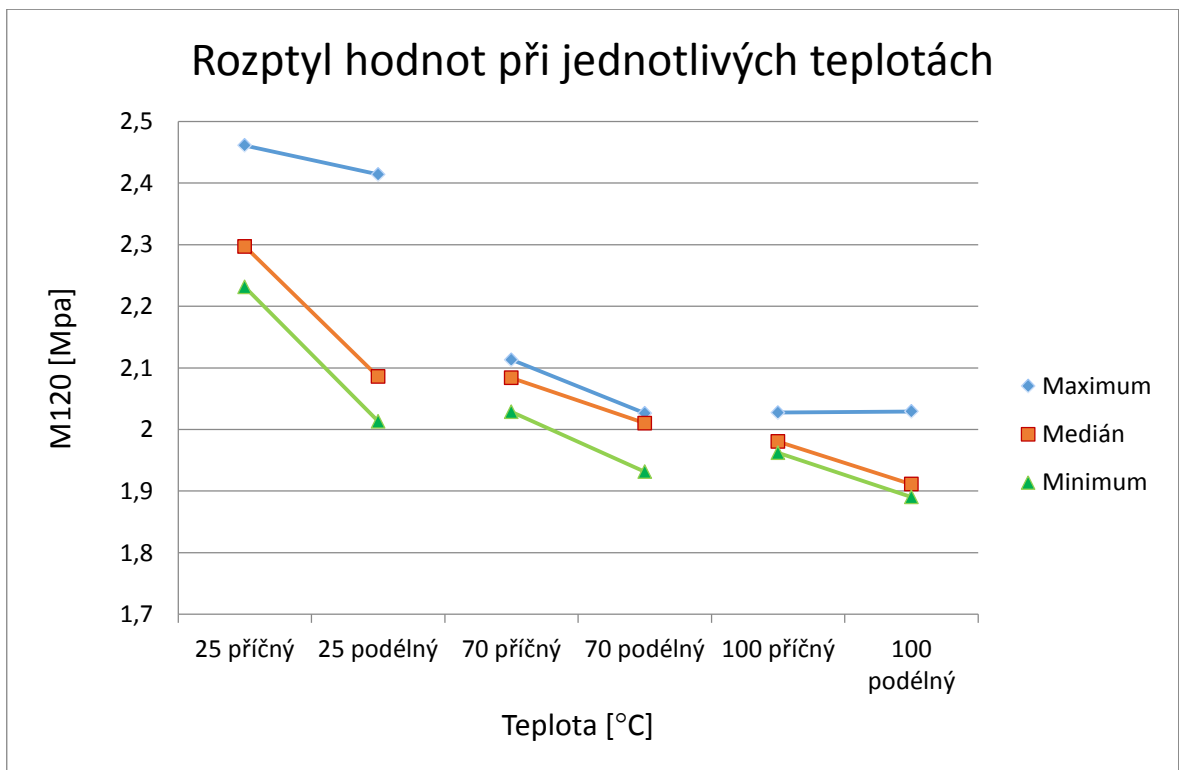
Obr. 45: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C5 při poměrném prodloužení 60%



Obr. 46: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 47: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%



Obr. 48: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C5 při poměrném prodloužení 120%

6.5.2 Zkouška dvouosé napjatosti

Tabulka 23: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C5

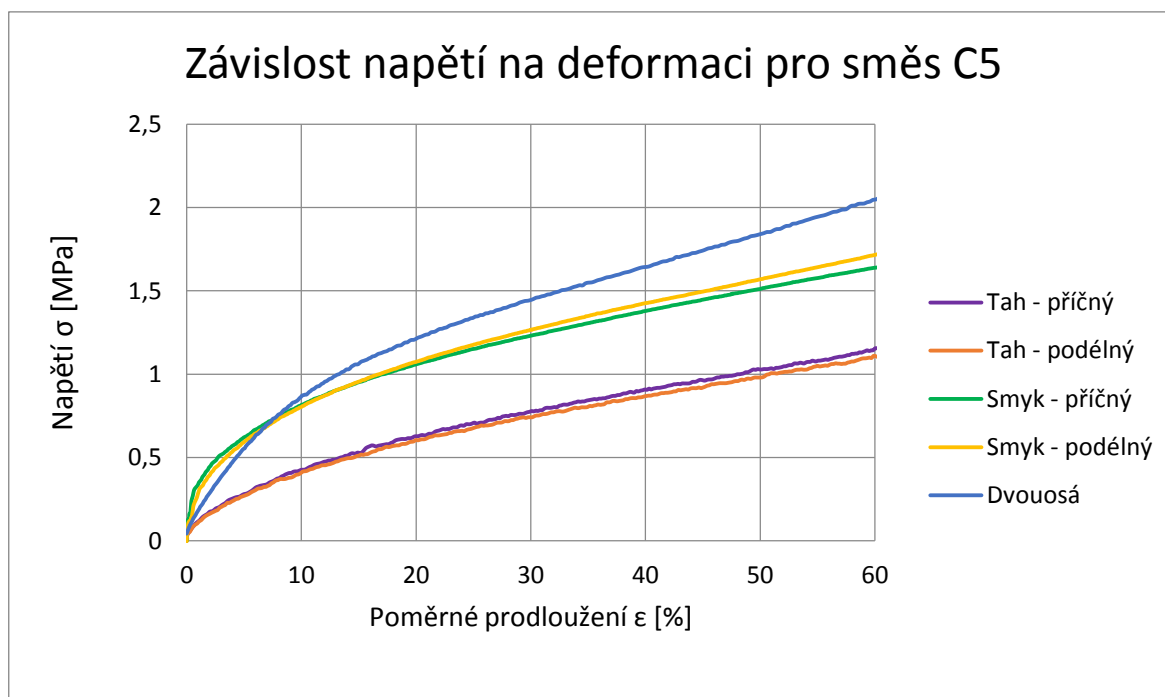
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5	1,47	1,36	1,39
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5	2,08	1,93	2,01

6.5.3 Zkouška čistým smykem

Tabulka 24: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C5

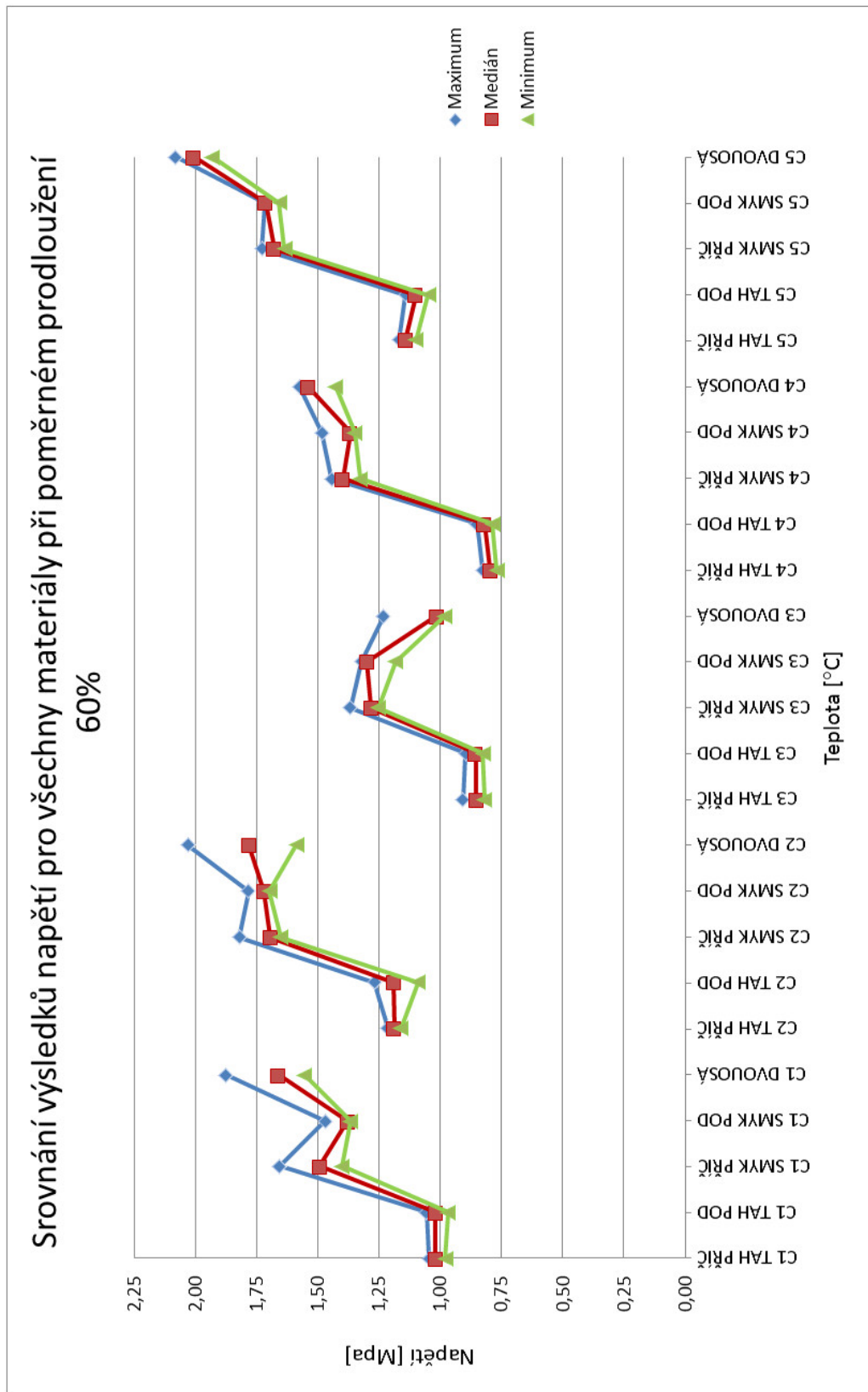
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Minimum	Medián
C5 příčný	1,31	1,13	1,29
C5 podélný	1,38	1,26	1,27
Napětí σ při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60\%$ [MPa]			
C5 příčný	1,73	1,64	1,68
C5 podélný	1,72	1,66	1,71

6.5.4 Srovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení



Obr. 49: Graf porovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C5

6.6 Srovnání naměřených hodnot pro všechny materiály



Obr. 50: Srovnání napětí při poměrném prodloužení 60% pro jednotlivé materiály při všech provedených zkouškách

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Všechny materiály byly podrobeny zkoušce jednoosé napjatosti (tahem), dvouosé napjatosti a zkoušce čistým smykem. V grafech, které byly vytvořeny na základě hodnot, které byly získány během těchto typů zkoušek, můžeme vidět, že výsledné hodnoty jsou ovlivněny kromě složení směsí a obsahem sazí také směrem válcování. Bylo zjištěno, že hodnoty napětí při zkoušce tahem dosahovaly výrazně nižších hodnot, než tomu bylo u zkoušek dvouosé napjatosti a čistým smykem.

Pro materiál C1 byla zjištěna při zkoušce jednoosým tahem pro 25 °C hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,02 MPa a v podélném směru válcování 1,02 MPa. Dále pro teplotu 70 °C hodnota mediánu v příčném směru válcování činila 1,07 MPa a v podélném směru 0,99 MPa. Pro teplotu 100 °C pak byla zjištěna hodnota mediánu v příčném směru válcování 1,05 MPa a v podélném směru 1,02 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% 1,66 MPa. Při zkoušce čistým smykem byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,49 MPa a v podélném směru válcování 1,38 MPa.

Pro materiál C2 byla zjištěna při zkoušce jednoosým tahem pro 25 °C hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,19 MPa a v podélném směru válcování 1,19 MPa. Dále pro teplotu 70 °C hodnota mediánu v příčném směru válcování činila 1,21 MPa a v podélném směru 1,17 MPa. Pro teplotu 100 °C pak byla zjištěna hodnota mediánu v příčném směru válcování 1,22 MPa a v podélném směru 1,21 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% 1,78 MPa. Při zkoušce čistým smykem byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,69 MPa a v podélném směru válcování 1,72 MPa.

Pro materiál C3 byla zjištěna při zkoušce jednoosým tahem pro 25 °C hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 0,85 MPa a v podélném směru válcování 0,86 MPa. Dále pro teplotu 70 °C hodnota mediánu v příčném směru válcování činila 1,00 MPa a v podélném směru 0,92 MPa. Pro teplotu 100 °C pak byla zjištěna hodnota mediánu v příčném směru válcování 0,88 MPa a v podélném směru 0,92 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% 1,02 MPa. Při zkoušce čistým smykem byla zjištěna hodnota mediánu

napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,28 MPa a v podélném směru válcování 1,30 MPa.

Pro materiál C4 byla zjištěna při zkoušce jednoosým tahem pro 25 °C hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 0,80 MPa a v podélném směru válcování 0,82 MPa. Dále pro teplotu 70 °C hodnota mediánu v příčném směru válcování činila 0,80 MPa a v podélném směru 0,75 MPa. Pro teplotu 100 °C pak byla zjištěna hodnota mediánu v příčném směru válcování 0,76 MPa a v podélném směru 0,77 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% 1,54 MPa. Při zkoušce čistým smykem byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,40 MPa a v podélném směru válcování 1,37 MPa.

Pro materiál C5 byla zjištěna při zkoušce jednoosým tahem pro 25 °C hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,14 MPa a v podélném směru válcování 1,10 MPa. Dále pro teplotu 70 °C hodnota mediánu v příčném směru válcování činila 1,07 MPa a v podélném směru 1,03 MPa. Pro teplotu 100 °C pak byla zjištěna hodnota mediánu v příčném směru válcování 1,04 MPa a v podélném směru 1,03 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% 2,01 MPa. Při zkoušce čistým smykem byla zjištěna hodnota mediánu napětí při poměrném prodloužení 60% v příčném směru válcování 1,68 MPa a v podélném směru válcování 1,71 MPa.

Pro všechny zkoušené materiály s výjimkou materiálu C3 vykazovaly při poměrném prodloužení 60% nejvyšší hodnoty napětí při zkoušce dvouosé napjatosti, nejnižší hodnoty pak při zkoušce jednoosým tahem a hodnoty napětí při zkoušce čistým smykem byli mezi nimi. U materiálu C3 hodnoty napětí u zkoušky čistým smykem převyšovaly hodnoty napětí u zkoušky dvouosé napjatosti.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo stanovení mechanických vlastností 5 různých směsí. Každá z těchto směsí byla testována pomocí zkoušky jednoosým tahem při třech různých teplotách, zkouškou dvouosé napjatosti a čistým smykem.

Měření probíhalo při laboratorních podmínkách v laboratořích na univerzitě. Zkouška jednoosým tahem byla provedena při teplotách 25 °C, 70 °C a 100 °C. Zkušební tělísko zde vždy bylo nejprve protahováno na 120% své původní délky, odlehčeno a poté následovalo 3x protažení na 60% své původní délky. Při zkoušce dvouosé napjatosti bylo tělísko kruhového tvaru nafukováno do poměrného prodloužení 60% a následně odlehčeno. U zkoušky čistým smykem bylo zkušební tělísko ve tvaru obdélníku natahováno do poměrného prodloužení 60%. Jak zkouška dvouosé napjatosti, tak i zkouška čistým smykem byly prováděny za teploty 25 °C.

Z uskutečněných zkoušek se zjišťovala závislost napětí na poměrném prodloužení. Získané hodnoty byly následně zaznamenány v tabulkách a grafech.

Ze zkoušených materiálů vykazovaly malou tuhost materiály C3 a C4, vysokou tuhost pak materiály C2 a C5.

Všechny materiály měly velmi podobné hodnoty napětí pro příčný směr válcování, i pro podélný směr válcování, takže se z vyhodnocení výsledků nedá jednoznačně určit, jestli se hodnoty napětí liší v závislosti na směru válcování.

U jednoosého tahu nelze s jistotou říci, zda hodnota napětí při poměrném prodloužení roste nebo klesá se zvyšující se teplotou. Pro většinu materiálů nebyla zjištěna výrazná změna napětí s rostoucí teplotou. U materiálu C5 hodnota napětí s rostoucí teplotou nepatrně klesá.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 8072042483.

[2] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.

[3] PREKOP, Štefan. *Gumárska technológia I*. Žilina: Žilinská univerzita, 1998, 282 s. ISBN 8071004839.

[4] DUCHÁČEK, Vratislav. *Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2006, 158 s. ISBN 8002017846.

[5] EIRICH, F. R., Burak ERMAN a James E. MARK, ed. *Science and technology of rubber*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005, xvii, 743 s. ISBN 0124647863.

[6] Jiří Maláč. Gumárenská technologie 2. Kaučuky1[online]. [cit. 2020-11-25]

Dostupné z: <https://docplayer.cz/84591-Jiri-malac-gumarenska-technologie-2-kaucuky-1-obsah.html>

[7] Jiří Maláč. Gumárenská technologie 4. Směsi1 Kaučuky[online]. [cit. 2020-11-

29] Dostupné z: <https://adoc.pub/jii-mala-gumarenska-technologie-4-smsi-1-obsah.html>

[8] POLYMER & FILLERS [online]. [cit. 2020-11-27] Dostupné z: <http://polymer-filler.blogspot.com/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.html>

[9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Změkčovadla*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2010, c2011, 207 s. ISBN 9788002022879.

[10] DUCHÁČEK, Vratislav. *Urychlovače vulkanizace*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2013, 156 s. ISBN 9788002024293.

[11] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2009, 93 s. ISBN 9788002021551.

[12] Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Springer US, 2009, 321s. ISBN 978-0-387-78746-6

[13] DAS GUPTA, Saikat, Rabindra MUKHOPADHYAY, Krishna C. BARANWAL a Anil K. BHOWMICK. *Reverse engineering of rubber products: concepts, tools, and techniques*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2014], xviii, 339 s. ISBN 978-0-8493-7316-9.

[14] DORFMANN, Al a Alan MUHUR. *Constitutive Models for Rubber*. Rotterdam: Brookfield, 1999. ISBN 90-5809-113-9.

[15] GENT, Alan N., ed. *Engineering with rubber: how to design rubber components*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2001, 365 s. ISBN 1569902992. Dostupné také z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpERHDRC06/engineering-with-rubber-2>

[16] Kohnke, P. ANSYS –Theory reference. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 1998. 965s.

[17] PRINCI, Elisabetta. *Rubber: Science and Technology*. Berlin: De Gruyter, [2019], 1 online zdroj (210 stran). De Gruyter STEM. Dostupné z: doi:9783110640328

[18] The Specimen Optimization for the Equibiaxial Test of Elastomers. The Specimen Optimization for the Equibiaxial Test of Elastomers [online]. Department of Production Engineering, Faculty of Technology, 1-4 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261844574_The_specimen_optimization_for_the_equibiaxial_test_of_elastomers

[19] KAUČUK - přírodní poklad z džungle | Gumotex čluny [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.gumotexcluny.cz/priodni-kaucuk-prirodni-poklad-z-dzungle>

[20] Natural Rubber | Polymerové typy - Resinex [online]. [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/natural-rubber.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NR [-]	Přírodní kaučuk
BR [-]	Butadienový kaučuk
SBR [-]	Butadien-styrenový kaučuk
IR [-]	Isoprenový kaučuk
EPM [-]	Ethylen-propylenový kaučuk
EPDM [-]	Ethylen-propylen-dienový kaučuk
CR [-]	Chloroprenový kaučuk
NBR [-]	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
ACM [-]	Akrylátový kaučuk
OT [-]	Polysulfidový kaučuk
Q [-]	Silikonový kaučuk
FKM [-]	Fluorokaučuky
PTFE [-]	Polytetrafluorethylen (teflon)
E [MPa]	Modul pružnosti v tahu/tlaku
G [MPa]	Modul pružnosti ve smyku
K [MPa]	Objemový modul pružnosti
ν [-]	Poissonovo číslo
W [J/m ³]	Měrná deformační energie
λ_i [-]	Poměrné protažení
I _i [-]	Deformační invarianty
l _i [m]	Deformovaná délka
l ₀ [m]	Původní délka
C _{ij} [-]	Složky pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace
S _{ij} [Pa]	Složky 2. Poola-Kirchhoffova tenzoru napětí
σ [MPa]	Napětí

δ_{ij} [-]	Kronekerovo delta
c_{ij} [Pa]	Materiálová konstanta
μ [Pa]	Smykový modul
n [-]	Počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu
T [K]	Absolutní teplota
k [-]	Boltzmannova konstanta
μ_i [-]	Materiálová konstanta
α_i [-]	Materiálová konstanta
λ_L [-]	Limitní síťové protažení
F [N]	Síla
ε [-]	Poměrné prodloužení
ε_p [%]	Tažnost
t [m]	Tloušťka
t_0 [m]	Původní tloušťka
r [m]	Poloměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Základní druhy kaučuků</i>	12
<i>Obr. 2: Těžba přírodního kaučuku z kaučukovníku brazilského [19]</i>	13
<i>Obr. 3: Příklady výrobků pro děti ze silikonového kaučuku [2]</i>	16
<i>Obr. 4: Závislost napětí a deformace během zatěžování elastomerů [11]</i>	23
<i>Obr. 5: Jednoosá napjatost [15]</i>	30
<i>Obr. 6: Dvouosá napjatost [15]</i>	32
<i>Obr. 7: Nafukování vzorku při třetím případě [11]</i>	32
<i>Obr. 8: Čistý smyk [15]</i>	34
<i>Obr. 9: Upnutí vzorku při zkoušce smykem</i>	34
<i>Obr. 10: Zkušební tělísko pro tahovou zkoušku</i>	37
<i>Obr. 11: Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti [18]</i>	39
<i>Obr. 12: Upevnění vzorku a nastavení kamer pro zkoušku dvouosé napjatosti</i>	39
<i>Obr. 13: Zkušební tělísko pro dvouosou napjatost</i>	40
<i>Obr. 14: Zkušební tělísko pro zkoušku čistým smykem</i>	41
<i>Obr. 15: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%</i>	44
<i>Obr. 16: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%</i>	44
<i>Obr. 17: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C1 při poměrném prodloužení 60%</i>	45
<i>Obr. 18: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%</i>	45
<i>Obr. 19: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C1 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%</i>	46
<i>Obr. 20: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C1 při poměrném prodloužení 120%</i>	46
<i>Obr. 21: Graf porovnání závislosti napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C1</i>	47
<i>Obr. 22: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C2 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%</i>	49
<i>Obr. 23: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C2 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%</i>	49
<i>Obr. 24: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C2 při poměrném prodloužení 60%</i>	50
<i>Obr. 25: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C2 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%</i>	50

<i>Obr. 26: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C2 při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 27: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C2 při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 28: Graf porovnání závislostí napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C2.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 29: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 30: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 31: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C3 při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 32: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 33: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C3 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C3 při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 35: Graf porovnání závislostí napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C3.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 36: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 38: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C4 při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 40: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C4 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 41: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C4 při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 42: Graf porovnání závislostí napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C4.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 43: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v příčném směru při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 44: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v podélném směru při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 45: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C5 při poměrném prodloužení 60%.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 46: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v příčném směru při poměrném prodloužení 120%.....</i>	<i>65</i>

<i>Obr. 47: Graf závislosti napětí na teplotě v tahu pro směs C5 v podélném směru při poměrném prodloužení 120%</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 48: Graf rozptylu hodnot napětí na měřené teplotě pro směs C5 při poměrném prodloužení 120%</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 49: Graf porovnání závislostí napětí na poměrném prodloužení u jednotlivých provedených zkoušek pro směs C5</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 50: Srovnání napětí při poměrném prodloužení 60% pro jednotlivé materiály při všech provedených zkouškách</i>	<i>68</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Složení zkoušených kaučukových směsí</i>	36
<i>Tabulka 2: Informace o trhacím stroji ZWICK</i>	36
<i>Tabulka 3: Informace o zařízení pro test dvouosé napjatosti</i>	38
<i>Tabulka 4: Informace o zařízení pro zkoušku čistým smykem</i>	41
<i>Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C1</i>	43
<i>Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C1</i>	43
<i>Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C1</i>	47
<i>Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C1</i>	47
<i>Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C2</i>	48
<i>Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C2</i>	48
<i>Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C2</i>	52
<i>Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C2</i>	52
<i>Tabulka 14: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C3</i>	53
<i>Tabulka 15: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C3</i>	53
<i>Tabulka 16: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C3</i>	57
<i>Tabulka 17: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C3</i>	57
<i>Tabulka 18: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C4</i>	58
<i>Tabulka 19: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C4</i>	58
<i>Tabulka 20: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C4</i>	62
<i>Tabulka 21: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C4</i>	62
<i>Tabulka 22: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 60% v tahu pro směs C5</i>	63
<i>Tabulka 23: Naměřené hodnoty napětí při poměrném prodloužení 120% v tahu pro směs C5</i>	63
<i>Tabulka 24: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs C5</i>	67
<i>Tabulka 25: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs C5</i>	67