

Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů

Miroslav Vaňhara

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav Vaňhara**

Osobní číslo: **T13128**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

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

Zásady pro vypracování:

1. Literární přehled
2. Příprava experimentu
3. Experiment
4. Vyhodnocení výsledků

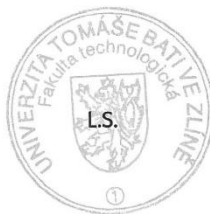
Rozsah bakalářské práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **8. ledna 2016**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: VANHARA MIROSLAV

Obor: PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ 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 1.5.2016

Vanhara Miroslav

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem práce bylo zkoušení hyperelastických materiálů a stanovení jejich vlastností. Použité materiály jsou používány pro výrobu pneumatik.

Materiály byly zkoušeny v čistém smyku, dvouosém tahu a jednoosém tahu při různých teplotních podmínkách.

Výsledky ze zkoušek čistým smykem a dvouosým tahem byly vyhodnoceny do grafů závislosti napětí na poměrném prodloužení. Pro jednoosou napjatost byly výsledkem grafické závislosti napětí na teplotě.

Klíčová slova: mechanické zkoušky, čistý smyk, jednoosá napjatost, dvouosý tah, hyperelastická, elastomer

ABSTRACT

The aim of this study was tested hyperelastic materials and determine their characteristics. This materials are used for tire production.

The materials were tested in pure shear, equibiaxial tension and uniaxial tension at different temperature conditions.

The results from test in pure shear and equibiaxial tension were evaluated in graphs of depending stress on strain. The results from uniaxial tension were evaluated in graphs of depending stress on temperature.

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

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce doc. Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D za příkladné vedení práce, trpělivost a cenné odborné rady, které mi poskytoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františkovi Vavříkovi za vstřícnou pomoc při vysekávání a přípravě zkušebních tělísek.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KAUČUKY	13
1.1 PŘÍRODNÍ KAUČUKY	13
1.2 SYNTETICKÉ KAUČUKY	14
1.2.1 Butadienstyrenové kaučuky (SBR)	14
1.2.2 Izoprenové kaučuky (IR).....	15
1.2.3 Butadienové kaučuky (BR)	16
1.2.4 Chloroprenový kaučuk (CR).....	16
1.2.5 Butadienakrylonitrilové kaučuky (NBR)	16
2 KAUČUKOVÉ SMĚSI	17
2.1 PLNIVA	17
2.2 ZMĚKČOVADLA	17
2.3 ANTIDEGRADANTY	18
2.4 VULKANIZAČNÍ SYSTÉMY	18
2.4.1 Vulkanizační činidla.....	19
2.4.2 Urychlovače	19
2.4.3 Aktivátory	19
2.4.4 Retardéry	20
2.5 ZVLÁŠTNÍ PŘÍSADY	20
2.5.1 Plastikační činidla	20
2.5.2 Nadouvadla	20
2.5.3 Faktisy	20
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	21
3.1 HYPERELASTICITA.....	21
3.2 OBECNÁ TEORIE HYPERELASTICKÝCH DEFORMACÍ.....	22
3.3 JEDNOOSÁ NAPJATOST	24
3.4 DVOUOSÁ NAPJATOST	24
3.5 ČISTÝ SMYK	25
3.6 PŘEHLED NELINEÁRNÍCH HYPERELASTICKÝCH MODELŮ	26
3.6.1 Mooney – Rivlin	26
3.6.2 Polynomický model	27
3.6.3 Ogden model	27
3.6.4 Neo-Hookean model	28
3.6.5 Arruda-Boyce model	28
3.7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY ELASTOMERŮ	28
3.7.1 Tahová zkouška (jednoosá napjatost)	28
3.7.2 Zkouška dvouosým zatížením (dvouosá napjatost)	30
3.7.3 Zkouška smyková (čistý smyk).....	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	33
4 CÍL PRÁCE	34

4.1	ZKOUŠENÝ MATERIÁL	34
4.2	POSTUPY MĚŘENÍ	35
4.2.1	ČISTÝ SMYK	35
4.2.1.1	POSTUP MĚŘENÍ	35
4.2.1.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA	35
4.2.1.3	PODMÍNKY MĚŘENÍ	36
4.2.1.4	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	36
4.2.1.5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	36
4.2.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA	37
4.2.2.1	POSTUP MĚŘENÍ	37
4.2.2.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA	37
4.2.2.3	PODMÍNKY MĚŘENÍ	38
4.2.2.4	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	38
4.2.2.5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	39
4.2.3	ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI	39
4.2.3.1	POSTUP MĚŘENÍ	39
4.2.3.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA	39
4.2.3.3	PODMÍNKY MĚŘENÍ	39
4.2.3.4	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	39
4.2.3.5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	40
5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	41
5.1	MATERIÁL S1	41
5.1.1	Čistý smyk	41
5.1.2	Dvouosá napjatost	41
5.1.3	Tah	42
5.2	MATERIÁL S2	46
5.2.1	Čistý smyk	46
5.2.2	Dvouosá napjatost	46
5.2.3	Tah	47
5.3	MATERIÁL S3	51
5.3.1	Čistý smyk	51
5.3.2	Dvouosá napjatost	51
5.3.3	Tah	52
5.4	MATERIÁL S4	56
5.4.1	Čistý smyk	56
5.4.2	Dvouosá napjatost	56
5.4.3	Tah	57
5.5	MATERIÁL S5	61
5.5.1	Čistý smyk	61
5.5.2	Dvouosá napjatost	61
5.5.3	Tah	62
5.6	MATERIÁL S6	66
5.6.1	Čistý smyk	66
5.6.2	Dvouosá napjatost	66
5.6.3	Tah	67
5.7	MATERIÁL S7	71
5.7.1	Čistý smyk	71

5.7.2	Dvouosá napjatost	71
5.7.3	Tah.....	72
5.8	SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT U JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ.....	76
DISKUZE VÝSLEDKŮ		77
ZÁVĚR		79
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		80
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		82
SEZNAM OBRÁZKŮ		84
SEZNAM TABULEK.....		88

ÚVOD

Elastomery jsou materiály, mezi jejichž nejzákladnější vlastnosti patří značná pružnost a poddajnost, která je patrná již pro malá zatížení. Po zatížení tyto materiály vykazují schopnost vracet se do svého původního stavu. V obecné praxi se tyto materiály používají v mnoha odvětvích, mezi nejznámější pak patří automobilový průmysl a výroba pneumatik. Své využití najdou i jako tlumící prvky či absorbéry energie.

Nejznámější elastomery jsou kaučuky, ty mohou být přírodního původu, vyráběny jsou i kaučuky syntetické. Základním produktem pro přírodní elastomery je syrový kaučuk, který se získává ze stromu *Hevea brasiliensis* ve formě tekutého latexu. Syntetické kaučuky jsou získávány polymerací nebo kopolymerací některých uhlovodíků.

Mechanické vlastnosti elastomerů se značně liší od vlastností jiných materiálů a neplatí pro ně Hookeův zákon. Pro měření a následné stanovení charakteristických vlastností těchto materiálů se využívá speciálních vyhodnocovacích metod. Aby bylo možné stanovit chování těchto materiálů, byla vytvořena řada materiálových modelů.

Elastomery jsou podtřídou polymerních materiálů zvláštní svými specifickými vlastnostmi. Elastomery se podrobují velkým deformacím i po zatížení relativně malými silami. Deformace je přitom převážně vratná. Jsou to amorfní polymery, jejichž teplota skelného přechodu T_g leží v intervalu 50-80 °C pod aplikační teplotou. Kaučukovité elastické chování elastomerů je dáno řídkým sesít'ováním polymeru. Elastomery, které mohou být sesít'ovány, jsou běžně označovány jako kaučuky, produktem jejich síť'ování je pryž. Nejdůležitějšími elastomery jsou cis-1,4-polyisopren, cis-1,4-polybutadien, kopolymery buta-1,3-dienu se styrenem a 2-methylpropenu (isobutylenu) s isoprenem, polyurethany, polysiloxany. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

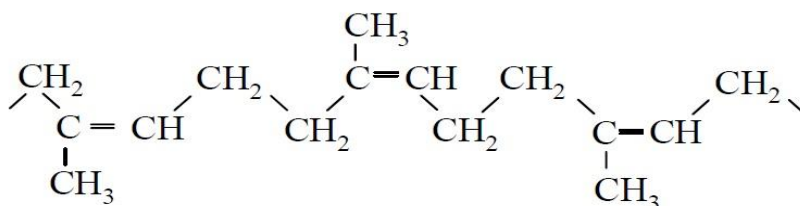
1 KAUČUKY

Kaučuk je základní surovinou pro přípravu kaučukové směsi. Patří do skupiny polymerů, které lze síťovat vulkanizací. Při pokojové teplotě tyto materiály vykazují vysokoelastické vlastnosti. Dle vlastního původu je lze rozdělit na přírodní a syntetické. [3]

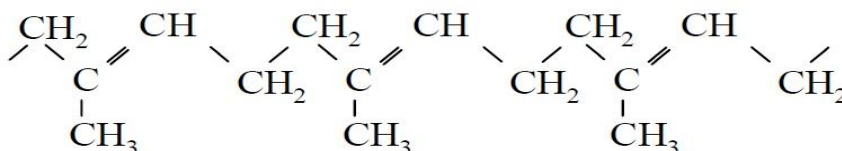
1.1 Přírodní kaučuky

Přírodní kaučuk se získává ve formě latexu ze stromů *Hevea brasiliensis*. Takto získaný latex se následně sráží pomocí chemických látek (kyseliny, soli, alkoholy). Složení latexu je závislé na mnoha faktorech, které jsou spojené se samotným růstem stromu až po způsob čepování samotného latexu. Latex je látka připomínající mléko, ať už konzistencí nebo svou charakteristickou bílou barvou.

Znalost struktury přírodního kaučuku je velmi důležitá pro potřeby gumárenské praxe a pro stanovení optimalizačních parametrů vulkanizátů. Uspořádání a konfigurace makromolekulárních řetězců může být cis- a nebo trans-. Konfigurace cis- (Obr. 1) při běžné teplotě společně s vlivem tepelného pohybu molekul znemožňuje přiblížení segmentů, nemůže tedy dojít k vytvoření krystalické struktury. U konfigurace trans- je však umožněno přiblížení řetězců bez vnějšího působení a může tak dojít k vytvoření krystalické struktury. Konfigurace trans- (Obr. 2) je typická pro gutaperču, vlastnostmi se od přírodního kaučuku odlišuje tvrdostí a menší elasticitou. [3]



Obrázek 1: Cis- konfigurace přírodního kaučuku



Obrázek 2: Trans- konfigurace gutaperče

1.2 Syntetické kaučuky

Syntetické kaučuky vznikly za účelem nahrazení přírodního kaučuku. Jsou uměle vyráběny z petrochemických surovin, z nichž se připraví monomery pro následnou polymeraci. Některé speciální syntetické kaučuky mohou mít lepší vlastnosti než samotný přírodní kaučuk. Kaučuk můžeme podle použití rozdělit do dvou skupin a to na syntetické kaučuky pro všeobecné použití a speciální syntetické kaučuky. [3]

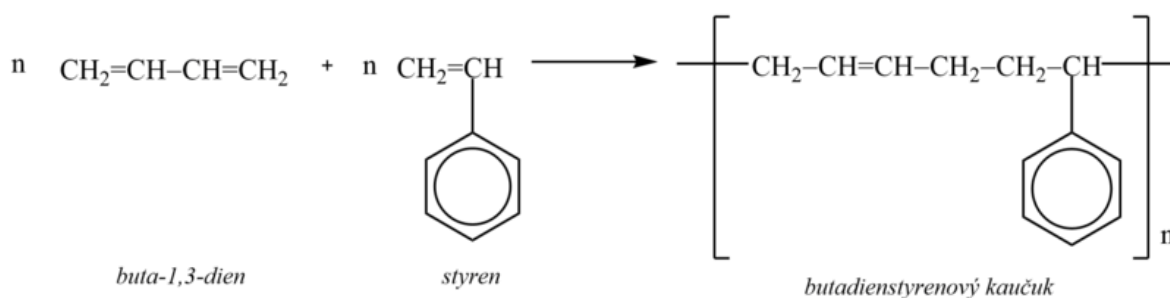
1.2.1 Butadienstyrenové kaučuky (SBR)

Butadienstyrenové kaučuky jsou vyráběny kopolymerací butadienu a styrenu (Obr. 3). V současnosti patří k nejrozšířenějším druhům a celosvětově nejzpracovávanějším kaučukům. Polymerace SBR kaučuků je realizována pomocí emulze, která může být prováděna za různých teplot. Běžné typy SBR obsahují obvykle 22 až 24 hm% styrenu. Pro lepší specifikaci musí být tyto kaučuky rozděleny do řady dalších podmnožin. Jako nejlepší kritérium pro tuto specifikaci se ukázal způsob výroby. [5]

První podmnožinou jsou kaučuky vyráběné teplou emulzní kopolymerací při teplotách 38 °C a vyšších. V současné době je většina teplých typů SBR zpracovávána přímo a až na řídké výjimky jsou stabilizovány nezbarvujícími antidegradanty. [4]

Studené emulzní butadienstyrenové kaučuky jsou kaučuky vyráběné pomocí radikálové polymerace s redukčně-oxidační iniciací při teplotách 10 °C a nižších. Patří mezi modernější typy. Mají pravidelnější strukturu a lepší vlastnosti. Obsahují 5 až 7 % mastných pryskyřičných kyselin, které vznikají rozkladem emulgátoru. Stabilizace je provedena antidegradanty zbarvujícími a nezbarvujícími. Pro zlepšení a zachování vlastností kaučuků se kaučuky plní sazemí nebo nastavují pomocí olejů.

Roztokové butadienstyrenové kaučuky jsou vyráběny za použití alkyllithiových katalyzátorů. Na rozdíl od předchozích druhů emulzí, mají tyto kaučuky horší zpracovatelnost zapříčiněnou absencí organických kyselin. Jejich použití je výhodné při výrobě běhounů pneumatik. Tyto druhy stále víc konkurují emulzním typům, zejména v souvislosti s používáním křemičitých plniv. [2,4]



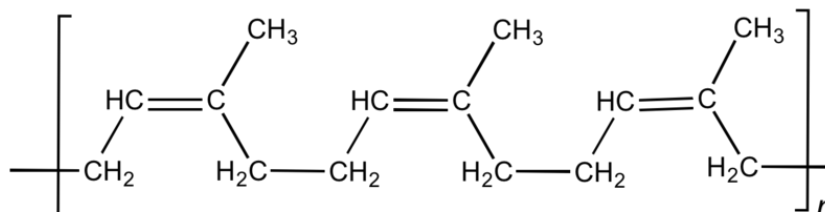
Obrázek 3: Polymerace SBR

1.2.2 Izoprenové kaučuky (IR)

Jedná se o kaučuk, který se jako první přiblížil vlastnostem přírodního kaučuku. Poprvé se tento kaučuk povedlo připravit v roce 1955 za použití stereo specifických katalyzátorů. Průmyslově vyráběné polyizopreny (Obr. 4) nejsou zcela identické s přírodním kaučukem, ale úpravami receptur a technologií zpracování se dá použít v určité části jako náhrada kaučuku přírodního. V minulosti měl tento kaučuk větší význam než v současnosti, protože cenově hůře konkuruje přírodnímu kaučuku.

Průmyslová výroba těchto IR kaučuků je uskutečňována dvěma druhy iniciačních systémů - komplexními katalyzátory Zieglerova typu a alkyllitiovými katalyzátory. Polymerace je uskutečněna v roztoku.

Syntetické polyizopreny neobsahují nekaučukovité látky, které mají kladný význam na rychlost vulkanizace, a proto se vulkanizují pomaleji než přírodní kaučuk. Vulkanizáty mají nižší moduly v tahu a větší tažnost než přírodní kaučuk. Pevnostní charakteristiky závisí na schopnosti orientace krystalizace. Klesá-li obsah 1,4- adice může docházet k zřetelnému poklesu pevnosti v tahu, strukturní pevnosti a odolnosti vůči trhlinám. [3]



Obrázek 4: Strukturální vzorec polyizoprenu

1.2.3 Butadienové kaučuky (BR)

Polybutadienové kaučuky jsou vyráběny roztokovou polymerací za pomoci organokovových katalyzátorů. Katalytický systém charakterizovaný použitým kovem ovlivňuje vlastnosti vyrobeného kaučuku specifickým způsobem. Nejvýznamnější je izometrie cis-1,4. BR kaučuky s vyšším obsahem cis formy mají lepší zpracovatelské vlastnosti. [3]

1.2.4 Chloroprenový kaučuk (CR)

Chloroprenový kaučuk patří mezi nejstarší syntetické kaučuky, přičemž si zachovává významné postavení. Má velmi dobré vlastnosti, a to: velkou elasticitu, malou hořlavost a dobrou odolnost proti stárnutí a povětrnostním vlivům. Výroba tohoto kaučuku se provádí emulzní polymerací, přičemž monomerní jednotky jsou vázány v trans - 1,4 poloze. K vulkanizaci pak není zapotřebí síra, lehce vulkanizují působením oxidů kovů, nejlépe působením MgO a ZnO.

Vulkanizáty CR mají velmi dobré dynamické a elastické vlastnosti, při deformaci vzniká krystalická fáze, proto i neplněné vulkanizáty mají vysoké pevnosti, zvýšenou odolnost vůči bobtnání. Používají se na výrobu dopravních pásů do dolů, hadic, těsnění, membrán, na výrobu klínových řemenů. [3]

1.2.5 Butadienakrylonitrilové kaučuky (NBR)

NBR jsou kopolymery, které se vyrábí za účelem speciálního použití. Jejich charakteristickou vlastností je odolnost vůči bobtnání v minerálních olejích a nepolárních rozpouštědlech. Význačnou vlastností je taky teplovzdornost. Nitrilkaučuk se dá vulkanizovat podobnými metodami jako běžné nenasycené kaučuky, což umožňují dvojité vazby v řetězcích. Největší význam má použití těchto kaučuků v automobilovém průmyslu na těsnění, která jsou odolná vůči benzínu a oleji. [3]

2 KAUČUKOVÉ SMĚSI

Kaučuková směs vzniká přidáním těch přísad kaučuku, které umožňují jeho vulkanizaci a dávají výrobku (vulkanizátu - pryži) žádané vlastnosti. Vmícháme-li do kaučuku jen některé přísady, vznikají předsměsi. Scházející složky se do předsměsi přidávají až před definitivním zpracováním kaučukové směsi a její vulkanizací. Předsměsi se velmi dobře skladují, nedochází totiž k jejich samovolnému znehodnocování. Naproti tomu při skladování již hotových kaučukových směsí může dojít po delší době k jejich navulkanizování. [2]

V gumárenské praxi se obvykle koncentrace přísad označuje zkratkou *dsk* (díly na sto dílů kaučuků). Základ gumárenské směsi vždy tvoří 100 dílů kaučuku) [8]

2.1 Plniva

Základní kaučuková směs, kterou tvoří kaučuk, vulkanizační systém a změkčovaadlo by byla z důvodu nízké pevnosti (okolo 2 MPa) sama o sobě technicky nepoužitelná (slovoled). Z těchto důvodů se do směsi přidávají plniva, která mění vlastnosti směsí. Změní se zpracovatelnost, měrná hmotnost vulkanizátu, pevnost, tažnost, technický modul, dynamické vlastnosti. Pevnost však po překročení jistého množství plniva klesá. Plniva se nejčastěji přidávají ve formě prášků. [3]

Plniva mohou být aktivní nebo neaktivní. Aktivní jsou ta plniva, která zlepšují technicky důležité vlastnosti a nazývají se ztužovaadla. Toto rozdělení je však nepřesné, protože neexistuje zcela inertní plnivo. Každé přidání plniva za účelem zlepšení daných vlastností bývá zpravidla doprovázeno zhoršením jiných vlastností. Musí se tedy zkoumat účelnost takového přidání. [6]

Z praktického hlediska pak rozdělujeme plniva na světlá plniva a saze.

2.2 Změkčovaadla

Změkčovaadla jsou organické látky, které dávají výrobkům ohebnost, tvárnost, vláčnost. Jsou většinou v kapalné nebo tuhé fázi. Snižují též teplotu skelného přechodu a viskozitu jejich tavenin. Aby daná přísada účinkovala jako změkčovaadlo, musí mít schopnost pronikat mezi makromolekulární řetězce a oddělovat je od sebe, musí být tedy pro danou směs rozpouštědlem. Jelikož rozpustnost souvisí s polaritou látek, lze říci, že polární látky mohou být změkčovaadly polárních polymerů a nepolární zase polymerů nepolárních.

Změkčovadla po přidání do kaučukových směsí usnadňují další zpracování, jako jsou míchání, válcování, vytlačování atd. Umožňují také připravovat a zpracovávat kaučukové směsi s velkým obsahem plniv, což je výhodné jak po stránce ekonomické, tak po stránce technické. Mohou také zlepšovat některé vlastnosti pryží, jako je například přilnavost běhounu k vozovce.

Pro nepolární kaučuky se používá většinu olejovitých produktů rafinace ropy, některých vedlejších výrobků ze zpracování uhelných dehtů, případně z chemického zpracování dřeva. Pro polární se pak používají jako změkčovadla estery dikarboxylových kyselin. [7]

2.3 Antidegradanty

Pryž stejně jako jiné materiály s časem mění své mechanické vlastnosti, změny bývají pak většinou k horšímu. Proces časové změny vlastností se pak nazývá stárnutí. Stárnutím se mění důležité technické vlastnosti, jako jsou pevnost, tažnost, modul pružnosti a tvrdost. Z těchto důvodů se do směsí přidávají antidegradanty. Hlavní činitel při stárnutí pryží je kyslík, který je přítomen v pryži v dostatečné koncentraci, aby mohl spustit oxidační reakci.

Nevulkanizovaný přírodní kaučuk obsahuje do jisté míry antioxidanty, které ho chrání při skladování, kaučuk tak lze skladovat po delší dobu. Při zpracovávání se pak ale tyto antioxidanty znehodnocují a je tedy nutno přidávat právě antidegradanty. [6]

Z funkčního hlediska lze antidegradanty rozdělit na dvě skupiny a to antioxidanty a antiozonanty. Toto rozdělení není příliš přesné, protože některé antioxidanty jsou zároveň i antiozonanty. Z chemického hlediska můžeme antidegradanty rozdělit na aminy, které jsou velmi účinné (avšak aminy mají tu vlastnost, že se na světle zbarvují) a na fenoly, které tvoří základ nezbarvujících se antidegradantů.

Pro skutečný a dlouhodobý účinek antidegradantů musí být dodrženo dávkování v dostatečném množství. Spodní hranice dávkování není vždy stejná. Všeobecně se antioxidanty dávkuje v množství 1 až 2 dsk, antiozonanty 2 až 5 dsk.

2.4 Vulkanizační systémy

Do vulkanizačního systému spadají ty přísady, které významně ovlivňují vlastnosti výrobku a v nemalé míře určují užitkové vlastnosti pryže. Do skupiny takovýchto přísad můžeme zařadit vulkanizační činidla, urychlovače, aktivátory a retardéry vulkanizace. [3]

2.4.1 Vulkanizační činidla

Vulkanizační činidla jsou látky schopné vytvářet příčné vazby mezi molekulami kaučukových uhlovodíků za pomoci chemické reakce. Pro zamezení neomezeného toku sousedních molekul stačí i málo příčných vazeb. Pomocí vulkanizace přechází vlastnosti kaučuku z plastického do elastického stavu. Vulkanizací se značně zlepši vlastnosti jako je pevnost, odrazová pružnost, odolnost vůči výkyvům teplot, roste tvrdost a modul pružnosti v tahu, snižuje se tažnost a trvalá deformace. Nejběžněji používanými činidly jsou síra, selen, telur, peroxidy, oxidy kovů, reaktivní pryskyřice, diamíny a diizokyanáty. [3]

2.4.2 Urychlovače

Urychlovače patří mezi nejdůležitější složky každé kaučukové směsi. Určují průběh vulkanizace a ovlivňují fyzikální vlastnosti vulkanizátu. Kromě podstatného zkrácení vulkanizační doby umožňují některé urychlovače snížit vulkanizační teplotu. Některé urychlovače pak kladně působí proti stárnutí vulkanizátu. Podle účinnosti lze urychlovače rozdělit na pomalé, rychlé, velmi rychlé, ultrarychlé a speciální.

Hlavními představiteli pomalých urychlovačů jsou guanidiny. Tento typ urychlovače se užívá převážně v kombinaci s rychlejšími urychlovači. Pomalé urychlovače se jako primární nehodí pro vulkanizaci na teplém vzduchu. Rychlé urychlovače patří mezi nejdůležitější. Patří sem urychlovače se zpožděným účinkem a urychlovače s plochou vulkanizační křivkou a dobrou odolností vůči stárnutí. Velmi rychlé urychlovače se používají za účelem zkrácení vulkanizační doby tak, že aktivují urychlovače pomalé nebo rychlé. [5]

2.4.3 Aktivátory

Aktivátory se rozumí skupina organických a anorganických látek, které ve směsi zaktivují účinek samotných vulkanizačních činidel. Samotná síra by jako vulkanizační činidlo neobstála. Při vulkanizaci sírou mají aktivátory zvyšující síťovací účinek. Jako aktivátory se běžně používají oxidy kovů, jako jsou ZnO, MgO, CaO, a z organických látek pak vyšší mastné kyseliny a jejich soli. Neznámějším aktivátorem sírné vulkanizace je již zmiňovaný ZnO. [3]

2.4.4 Retardéry

Jedná se v podstatě o urychlovače se zpožděným účinkem, které jsou používány za účelem zpomalení vulkanizace, aby nedocházelo k pálení směsi, způsobené předčasným navulkanizováním. Retardéry tedy prodlužují zpracovatelskou bezpečnost. [6]

2.5 Zvláštní přísady

Mezi další aditiva můžeme zařadit tzv. zvláštní přísady. Mezi ně spadá skupina plastifikačních činidel, nadouvadel a faktisů.

2.5.1 Plastikační činidla

Jsou to složité aromatické sloučeniny, které se používají k urychlení plastikace. Umožňují podstatně zkrátit plastikační dobu, což přináší úspory a zlepšuje výkon. Plastikační činidla musí být snadno vmíchatelné do kaučuku, nesmějí ovlivňovat samotný průběh vulkanizace, nesmějí ovlivňovat vlastnosti vulkanizátu, musí být zdravotně nezávadné.

2.5.2 Nadouvadla

Tyto přísady jsou určeny pro pórovitou pryž. Nadouvadla se působením vulkanizační teploty mění v plynnou složku a tvoří ve směsi póry. Jako nadouvadla se používají nejčastěji uhličitan amonný či hydrouhličitan sodný.

2.5.3 Faktisy

Faktisy jsou látky, které vznikají reakcí vysychavých či polovysychavých olejů se sírou za zvýšených teplot. Nejčastěji se používá faktis bílý a faktis hnědý. Faktisy obecně zlepšují hladkost povrchu a rozměrovou stálost. [5]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ

Mechanické vlastnosti elastomerů jsou odlišné oproti ostatním materiálům. Souhrn těchto odlišných vlastností se nazývá hyperelasticita a materiály jsou označovány jako hyperelastické.

3.1 Hyperelasticita

Hyperelasticita je určena několika hlavními znaky.

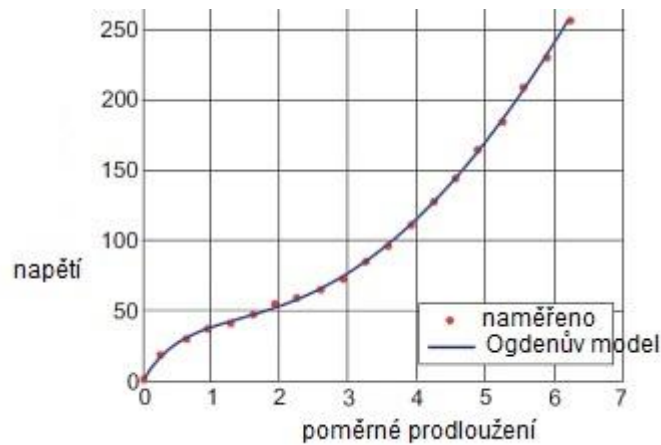
Prvním ze znaků je dosažitelnost velkých elastických deformací, které jsou mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Protážení při přetržení dosahuje několika set procent původní délky.

Druhým znakem je silně nelineární závislost napětí na deformaci. Tvar této nelineární závislosti má charakteristický esovitý průběh (Obr. 5).

Dalším ze znaků je deformovatelnost materiálu již při zatížení malými silami. Poměr mezi napětím a deformací v oblasti malých deformací je přibližně desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek.

Neposledním znakem je pak velmi vysoká objemová tuhost patrná u většiny elastomerů. Objemový modul pružnosti je roven někdy až tisícům MPa. Jelikož je mezi napětím a deformací malý poměr, jak již bylo zmíněno, blíží se Poissonův poměr číslu 0,5. Většinu materiálů tak můžeme považovat za objemově nestlačitelné.

Z těchto definovaných znaků je vidno, že nejsou splněny základní podmínky pro užití Hookeova zákona (Závislost mezi deformací a napětím není lineární a dochází zde k velkým deformacím). Pro dostatečně přesné výpočty je nutno použít nelineární popis závislosti napětí na deformaci. [9]



Obrázek 5: Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [14]

3.2 Obecná teorie hyperelastických deformací

Obecné řešení pro tah a tlak u pryžových materiálů vyvinul Rivlin. Toto řešení je provedeno ze vztahu pro měrnou deformační energii, který může být funkcí deformačních invariantů nebo funkcí poměrných protažení.

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

, kde I_i jsou invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, λ_i jsou hlavní protažení a $\{M\}$ je množina materiálových konstant. [9]

Protažení λ_i je poměrem deformované délky l_i ve směru osy i ku původní délce l_{0i} .

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

Deformační invarianty jsou definovány rovnicemi

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

Pro materiály, které jsou nestlačitelné je invariant I_3 roven 1. [9]

Jestliže známe funkci W , lze napětí vypočítat pomocí derivace této funkce podle příslušných složek deformace.

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

, kde S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru.

Zvolíme-li souřadný systém souhlasně s hlavními směry deformace, pak je pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován následovně

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

Lze tedy odvodit vztah pro hlavní složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí). [12]

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial I_i} - p \quad (6)$$

Pro nestlačitelné materiály lze z rovnice (1) eliminovat složka λ_3 , měrná deformační energie pak bude pouze funkcí λ_1, λ_2 , tedy: [12]

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial I_1} \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \end{aligned} \quad (7)$$

Rovnice pro Cauchyho napětí je definována ve tvaru

$$t_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \frac{\partial W}{\partial I_1} \cdot C_{ij} - 2 \cdot \frac{\partial W}{\partial I_2} \cdot C_{ij}^{-1} \quad (8)$$

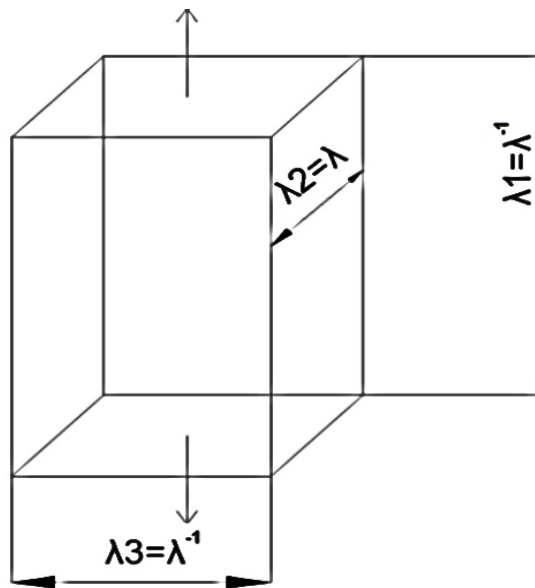
3.3 Jednoosá napjatost

O jednoosé (přímkové) napjatosti (obr. 6.) mluvíme tehdy, je-li těleso namáháno silou v jednom směru. Prodloužení je definováno pomocí poměrného protažení, kdy λ_2 je rovno protažení λ a λ_1, λ_3 je rovno převrácené hodnotě protažení λ . Předpokladem pro jednoosou napjatost je objemová nestlačitelnost. Za předpokladu $\sigma_2 = \sigma_3$ a $\sigma_2 = 0$ můžeme definovat rovnici neznámého stlačení [12]

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

Dosadíme-li rovnici (9) do rovnice (8), dostáváme rovnici pro skutečné napětí jednoosého namáhání.

$$t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (10)$$



Obrázek 6: Jednoosá napjatost

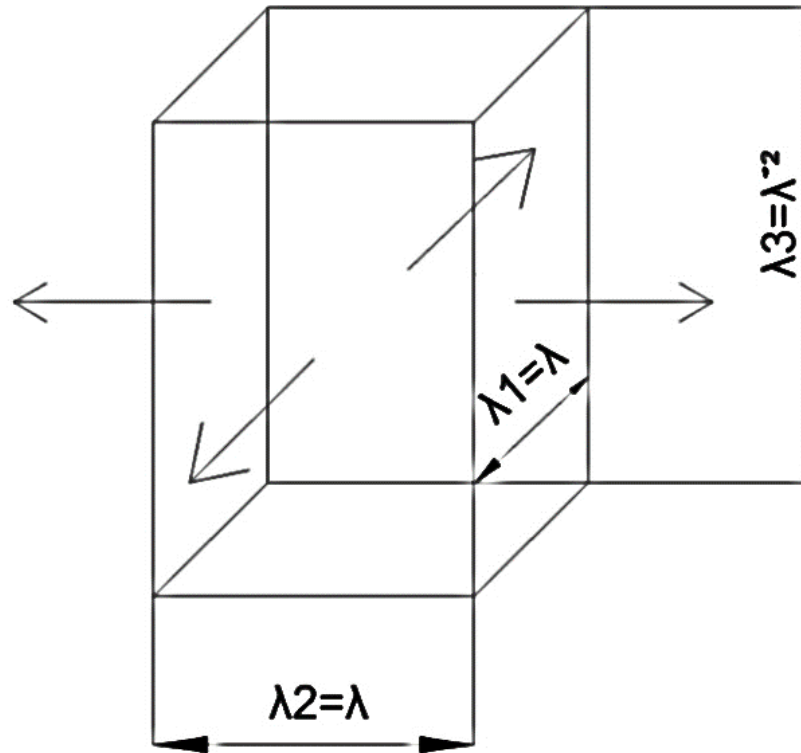
3.4 Dvouosá napjatost

Pro vyjádření vztahů a rovnic pro dvouosé namáhání (obr. 7) lze vycházet ze vztahů pro jednoosou napjatost. Protože namáhání probíhá dvěma směry, je nulová složka pouze pro σ_3 . Poměrné protažení λ_1 a λ_2 jsou totožné a rovny protažení λ . Poměrné protažení λ_3 je pak rovno druhé mocnině převrácené hodnoty protažení λ . Rovnice pro neznámé stlačení má tedy tvar

$$P = -2 \left[\frac{1}{\lambda^4} \frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda^4 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (11)$$

Pro napětí lze pak napsat rovnici ve tvaru

$$t_1 = t_2 = 2 \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) \quad (12)$$



Obrázek 7: Dvouosá napjatost

3.5 Čistý smyk

Definice čistého smyku (obr. 8) vychází z předpokladu, že napětí je aplikované v jednom směru a zároveň je zabráněno šířky. Platí tedy, že šířka zůstává nezměněna, tedy $\lambda_2 = 1$. Při čistém smyku nedochází při deformaci k rotování žádné z hlavních os. Pro čistý smyk lze definovat rovnici neznámého stlačení následovně

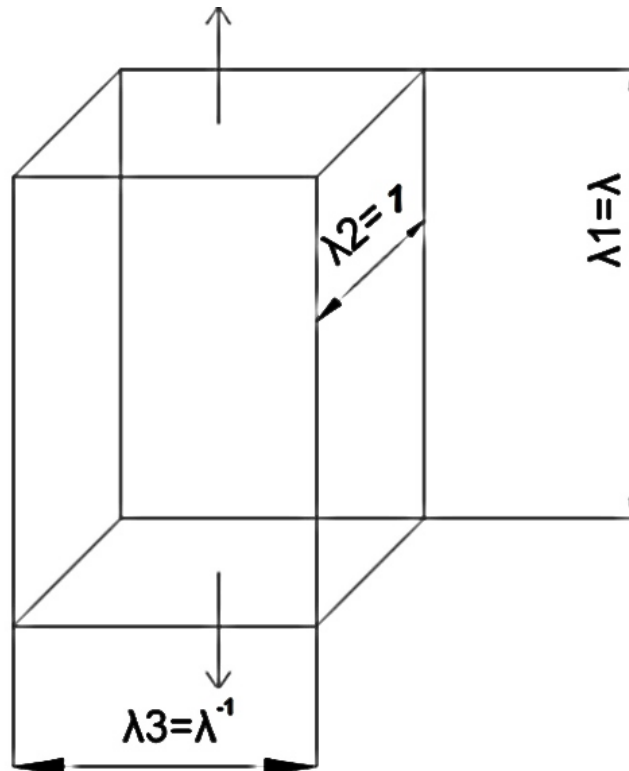
$$P = -2 \left[\frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (13)$$

Následně můžeme stanovit Cauchyho napětí ve tvaru

$$t_1 = t = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (14)$$

$$t_2 = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (15)$$

Poměrné protažení ve směru 1 je rovno $\lambda_1 = \lambda$ a ve směru 3 jako $\lambda_3 = \lambda^{-1}$.



Obrázek 8: Čistý smyk

3.6 Přehled nelineárních hyperelastických modelů

Každý hyperelastický model se odlišuje jinou definicí funkce pro měrnou deformační energii. V této práci jsou dále uvedeny dnes nejpoužívanější tvary.

3.6.1 Mooney – Rivlin

Model Mooney-Rivlin se používá v několika modifikacích, a to jako 2 – parametrický, 5 – parametrický nebo 9 - parametrický. Počet parametrů je závislý na řádu polynomu, kterým se aproximuje energie napjatosti. [10]

2- parametrický model:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (16)$$

Nevýhodou tohoto modelu je neschopnost popisu inflexe křivky popisující deformačně-napěťovou charakteristiku. Obecně je doporučeno použití tohoto modelu do 100% deformace při jednoosém tahovém namáhání.

5 - parametrický model:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + C_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (17)$$

Tento model oproti 2 - parametrickému může popsat inflexi deformačně napěťové křivky. [10]

9 - parametrický model:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + C_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + C_{21}(\bar{I}_1 - 3)^2(\bar{I}_2 - 3) + C_{21}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3)^2 + C_{03}(\bar{I}_2 - 3)^3 + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (18)$$

Pokud zobecníme výše uvedené Mooney-Rivlin modely, dostáváme model polynomický. [10]

3.6.2 Polynomický model

Tento model se v praxi používá tam, kde deformace dosahují přibližně 300 % [9]

$$W = \sum_{i+j=1}^n c_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^m \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (19)$$

Jak již bylo výše zmíněno, tento model zobecňuje Mooney – Rivlinův model.

3.6.3 Ogden model

Tento model je založený na vyjádření napěťové deformační funkce pomocí hlavního protažení. Dle literatury je tento model vhodný až pro 700% deformace.

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{-\alpha_i} + \lambda_2^{-\alpha_i} + \lambda_3^{-\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i} \quad (20)$$

Tento model se při jistém dosazení stává ekvivalentem pro Mooney-Rivlin či Neo-Hookean model. [9,10]

3.6.4 Neo-Hookean model

U tohoto modelu je tvarová změna popsána pouze jednou materiálovou konstantou, resp. smykovým modulem G . Jedná se o snadno pochopitelný vzorec, je formulačně nej-jednodušší. Použití je možné pro deformace do 40 – 50 % při jednoosém tahovém namáhání. Není vhodný pro větší deformace.

$$W = \frac{G}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (21)$$

, kde d je parametr nestlačitelnosti materiálu je roven polovině objemového modulu pružnosti k . [10,11]

3.6.5 Arruda-Boyce model

Formulace modelu je poměrně složitá. Tento model vychází ze statické mechaniky. V tomto modelu se objevuje limitní síťové protažení λ_L a jedná se o protažení, při kterém se napětí blíží nekonečnu. Tento model se může stát ekvivalentním s Neo-Hookean modelem tehdy, jestliže se λ_L rovná nekonečnu.

$$W = G \left[\frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_L^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{1}{1050\lambda_L^4} (\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{1}{7000\lambda_L^6} (\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_L^8} (\bar{I}_1^5 - 243) + \frac{1}{d} (J_2 - 12 - \ln J) \right] \quad (22)$$

3.7 Mechanické zkoušky elastomerů

Pomocí mechanických zkoušek a jejich následným vyhodnocením lze charakterizovat daný materiál. Na rozdíl od zkoušek elastických materiálů se u zkoušení elastomerů vyskytuje řada problémů. Pro mnoho hyperelastických materiálů je nejpřesnější víceosé zkoušení, nejlépe totiž zachytí konstitutivní vztahy pro pryže. [12]

Standardně se provádí zkoušky na jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Z výsledků těchto testovacích metod získáme konstanty pro hyperelastické modely. Vzhledem k tomu, že každý daný elastomer má specifické vlastnosti, je nutné pro každou konkrétní analýzu přesně stanovovat materiálové konstanty daných materiálů. [9]

3.7.1 Tahová zkouška (jednoosá napjatost)

Tahová zkouška se provádí dle normy ČSN ISO 37. Zkouška se provádí na zkušebních tělískách, které se připravují vysekáváním. Tvar těchto tělísek (oboustranné lopatky)

přibližuje namáhání v praktických podmínkách. Normalizované zkušební tělísko tedy deformujeme konstantní rychlostí a zaznamenáváme průběh změny sledované fyzikální hodnoty. Měření probíhá až do přetržení zkušebního tělíska. Z naměřených hodnot pak vyhodnocujeme charakteristiky materiálů. [13]

Při tahové zkoušce se definují následující pojmy:

Smluvní napětí – Smluvní napětí je definováno jako podíl síly, působící kolmo k uvažovanému průřezu, vzhledem k původnímu průřezu.

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

Prodloužení – Prodloužení je definováno jako rozdíl měřené délky pracovní oblasti zkušebního tělesa v daném okamžiku zkoušky a původní délky.

$$\Delta l = l - l_0 \quad (24)$$

Poměrné prodloužení – Poměrné prodloužení udává poměrnou změnu délky vzhledem k původní měřené délce. Poměrné prodloužení se udává v procentech.

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

Tažnost – Tažnost je poměrné prodloužení určené v okamžiku přetržení zkušebního tělíska.

$$\varepsilon_P = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (26)$$

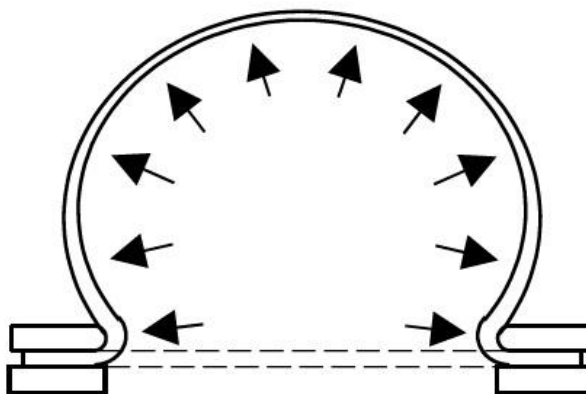
V praxi se měří napětí, kterého se dosáhne pro předem definované prodloužení. Takto získaná hodnota se nazývá modul v tahu. Tato hodnota není totožná jako Youngův modul pružnosti. Podle jakosti elastomerů se určuje modul při různých prodlouženích. Nejčastěji stanovujeme modul při poměrných prodlouženích 50, 100, 300 % pro elastomery, které mají tažnost do 400 %. Pro elastomery s tažností do 750 % se určuje modul pro poměrné prodloužení 100, 300, 500 %. Pro elastomery, které mají tažnost více, jak 750 % se pak určuje modul pro poměrné prodloužení 300, 500 a 700 %. [8]

V praxi se taky vyskytuje pojem rovnovážný modul. Rovnovážný modul je hodnota modulu, která se s časem již prakticky nemění. Určíme ho tak, že zkušební tělísko napínáme plynule rychlostí až na předepsanou hodnotu poměrného prodloužení pracovní části zkušebního tělesa. V tom okamžiku se zastaví napínání a zatížení začne postupně klesat. Každou minutu pak odečítáme hodnoty modulu tak dlouho, až tři bezprostředně po sobě

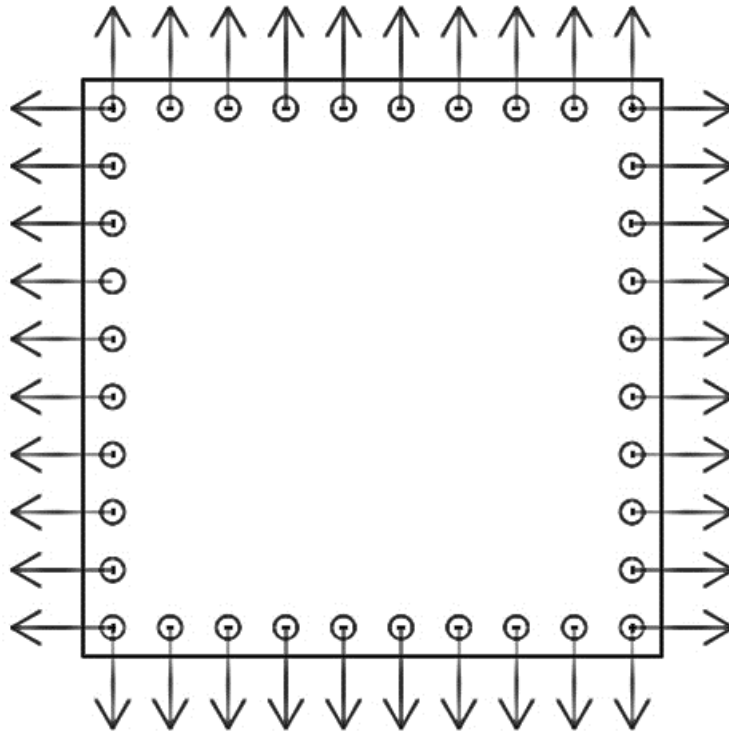
jdoucí údaje mají prakticky stejnou hodnotu. Aritmetický průměr těchto tří údajů pak určuje velikost rovnovážného modulu. [8]

3.7.2 Zkouška dvouosým zatížením (dvousá napjatost)

Při zkouškách na dvouosou napjatost napínáme uchycené zkušební tělísko ve všech směrech roviny. Toho lze dosáhnout několika způsoby. Prvním možným způsobem je nafouknutí zkušebního tělíska pomocí stlačeného vzduchu (Obr. 9). Druhým způsobem je natahování zkušebního tělíska čtvercového tvaru do dvou navzájem kolmých směrů (Obr. 10). Třetím způsobem je natahování zkušebního tělíska kruhového tvaru radiálně ve směru od středu. [16]



Obrázek 9: Dvousá napjatost pomocí membránového nafouknutí [16]



Obrázek 10: Schéma měření dvouosé napjatosti natahováním čtverce

Konstrukčně nejjednodušším způsobem je metoda nafukování. Obtížnější ale může být způsob, kterým snímáme deformace v průběhu testování. Stanovit tloušťku je obtížné, ale zavedeme-li podmínku objemové nestlačitelnosti materiálu, pak tloušťku můžeme vypočítat následovně:

$$t = \frac{t_0}{\lambda^2} \quad (27)$$

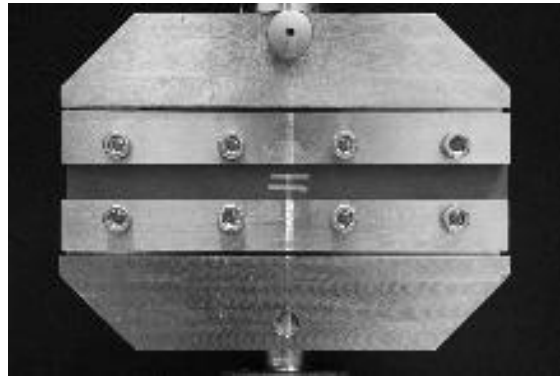
, poměrné protažení λ vychází z rovnice (2).

V tomto případě nafukování se jedná o membránu, napětí lze tedy po dosazení rovnice (27) do obecné rovnice membránového napětí psát ve tvaru [16]

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

3.7.3 Zkouška smyková (čistý smyk)

Tento typ zkoušky vychází ze zkoušky tahové, zkušební tělísko je upnuto a podélně natahováno v jednom směru (Obr. 11). Podmínkou je, že šířka tělíska musí být nejméně desetinásobkem jeho výšky, aby se zabránilo příčné kontrakci. Z testování pak dostaneme materiálové konstanty potřebné pro FEM modely a charakteristický popis materiálu. Zpracování výsledků je podobné jako u kapitoly 3.7.1 a popsáno rovnicemi (23) a (25). [16]



Obrázek 11: Zkouška smykem

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo stanovení mechanických vlastností zadaných elastomerů. Tyto vlastnosti byly stanoveny pomocí zkoušky čistým smykem, zkoušky dvouosého namáhání a tahovou zkouškou, která byla prováděna za různých teplot.

4.1 ZKOUŠENÝ MATERIÁL

Jednotlivé druhy směsí a jejich složení byly zaznamenány do tabulky (Tab. 1).

SMĚS	DSK	KAUČUK
Směs 1	55	NR, BR, SBR
Směs 2	76	NR, BR
Směs 3	60	NR, BR, SBR
Směs 4	54	NR, BR
Směs 5	50	NR, CIIR + 50dsk butylregenerát
Směs 6	60	CIIR
Směs 7	100	NR, BR, SBR 1723

Tabulka 1: Složení jednotlivých směsí

4.2 POSTUPY MĚŘENÍ

4.2.1 ČISTÝ SMYK

4.2.1.1 POSTUP MĚŘENÍ

1. Byla nastříhána jednotlivá zkušební tělíska z každé směsi. (Podrobněji popsáno v kapitole 4.2.1.2)
2. V softwaru TRAPEZIUM byla nastavena metoda měření čistého smyku, hodnoty rozměrů zkušebních tělísek, které byly měřeny posuvným měřidlem.
3. Zkušební tělísko bylo upnuto do čelistí trhacího stroje SHIMADZU AGS-50kNXD, byly umístěny značky, které následně snímala digitální kamera a měřila protažení tělíska.
4. Byl spuštěn test, který probíhal do poměrného protažení 50 % pro určení modulu M50. Tělísko bylo natahováno rychlostí 20 mm/min. Software TRAPEZIUM zaznamenával průběh závislosti napětí na poměrném protažení.
5. Po dosažení protažení zkušebního tělíska o 50 % byl test ukončen, tělísko bylo následně uvolněno a bylo upnuto nové tělísko.
6. Tento postup byl aplikován celkem pro všech 42 měření.

4.2.1.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA

Bylo nastříháno 6 zkušebních tělísek (3 podélné a 3 příčné se směrem válcování materiálu) z každé ze 7 směsí (Obr. 12). Každé tělísko bylo popsáno svým číslem a jasně definován značkou, která určovala směr válcování. Tělíska byla stříhána na rozměry 240mm x 80mm. Tloušťka byla dána válcováním, průměrně 2,50 mm.



Obrázek 12: Schéma vystřiženého zkušebního tělíska pro čistý smyk

4.2.1.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření probíhalo při laboratorní teplotě 24°C a laboratorních podmínkách.

4.2.1.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Název zařízení	SHIMADZU AGS – 50kNXD
Rozsah zdvihu příčnicku	0 mm až 1250 mm
Rozsah zkušební rychlosti příčnicku	0,001 mm/min až 1600 mm/min
Šířka pracovního prostoru	425 mm
Maximální nastavitelná síla	50 kN
Přesnost měření	± 1 % indikované síly
Použitý software	TRAPEZIUM
Trhací zařízení odpovídá normě ISO 7500-1 třídy 1	

Tabulka 2: Informace o zkušebním zařízení SHIMADZU

4.2.1.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zpracování výsledků probíhalo dle teoretické části (kapitoly 3.7.3 a 3.7.1). Vyhodnocení pak bylo zaznamenáno do grafů a tabulek.

4.2.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA

4.2.2.1 POSTUP MĚŘENÍ

1. Byla vysekána jednotlivá zkušební tělíska z každé směsi. (Podrobněji popsáno v kapitole 4.2.1.2)
2. V softwaru testXpert II byla nastavena metoda měření a hodnoty rozměrů zkušebních tělísek, které byly měřeny posuvným měřidlem.
3. Před měřením bylo každé zkušební tělísko temperováno po dobu 20 minut.
4. Tělísko bylo upnuto do čelistí trhacího stroje ZWICK 1456, který byl vybaven teplotní komorou, na které se nastavila požadovaná teplota, při které test probíhal.
5. Po vyhřátí teplotní komory byl spuštěn test, který probíhal cyklicky. Nejprve bylo tělísko protaženo na 60 % původní délky, poté odlehčeno a následně 5x probíhal cyklus protažení na 30 % původní délky.
6. Po dokončení cyklů byl test vypnut a bylo upnuto další zkušební tělísko.
7. Tento postup byl aplikován celkem pro 3 různé teploty (24°C, 70°C, 100°C), celkem pro 210 měření.

4.2.2.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA

Pomocí vysekávacího nože, který odpovídal normě ČSN ISO 37, byla vysekána zkušební tělíska ve tvaru oboustranných lopatek (Obr. 13), vždy 15 ve směru válcování a 15 proti směru válcování z každé ze směsí. Z tabulky norem byl určen vysekávací nůž typu 1 (tab. 3).

Rozeř	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A Celková délka (minimální) ¹⁾	115	75	50	35
B Šířka lopatek	25,0 ± 1,0	12,5 ± 1,0	8,5 ± 0,5	6,0 ± 0,5
C Délka zúžené části	33,0 ± 2,0	25,0 ± 1,0	16,0 ± 1,0	12,0 ± 0,5
D Šířka zúžené části	6,0 ± 0,4	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,0 ± 0,1
E Přechodový polomeř vnější	14,0 ± 1,0	8,0 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3,0 ± 0,1
F Přechodový polomeř vnitřní	25,0 ± 2,0	12,5 ± 1,0	10,0 ± 0,5	3,0 ± 0,1
¹⁾ Vnější celková délka může být nutná pro zajištění, aby do kontaktu s čelistmi stroje přicházely jenom rovnoběžné části rozšířených konců, což zabraňuje trhání zkušebních těles v rozšiřujících částech				

Tabulka 3: Tabulka rozměrů vysekávacích nožů dle normy ČSN ISO 37



Obrázek 13: Schéma zkušebního tělíska pro zkoušku tahem

4.2.2.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření probíhalo při teplotách, které byly nastavovány v teplotní komoře. Postupně probíhalo měření pro teplotu 24°C, 70°C, 100°C.

4.2.2.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Název zařízení	ZWICK 1456
Maximální rychlost posuvu	800 mm/min
Teplotní komora	-80 / 250°C
Maximální nastavitelná síla	20 kN
Použitý software	testXpert II
Trhací zařízení odpovídá normě ISO 7500-1 třídy 1	

Tabulka 4: Informace o zkušebním zařízení ZWICK 1456

4.2.2.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zpracování výsledků probíhalo dle teoretické části (kapitoly 3.7.1). Vyhodnocení pak bylo zaznamenáno do grafů a tabulek.

4.2.3 ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI

4.2.3.1 POSTUP MĚŘENÍ

1. Byly nastříhány zkušební tělíska kruhového tvaru o průměru 80mm tak, aby bylo možno upnutí do zkušebního zařízení
2. Na tělíska byly uprostřed nakresleny dva pruhy o vzájemné vzdálenosti 10mm, které byly výchozí pro samotné měření
3. Tělísko bylo upnuto do zkušebního zařízení
4. Byla nastavena měřicí kamera, která byla zaměřena a zaostřena na výchozí rovnoběžky a zaznamenávala celý průběh měření
5. Postupně byl na zkušebním zařízení přidáván tlak a tělíska byla nafukována až do doby, kdy se vzdálenost rovnoběžek protáhla o 30 %.
6. Následně byly fotografie z kamery vyhodnocovány v programu AutoCAD a pomocí programu Excel byly vyhodnoceny grafy závislosti průběhu napětí na poměrném prodloužení

4.2.3.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA

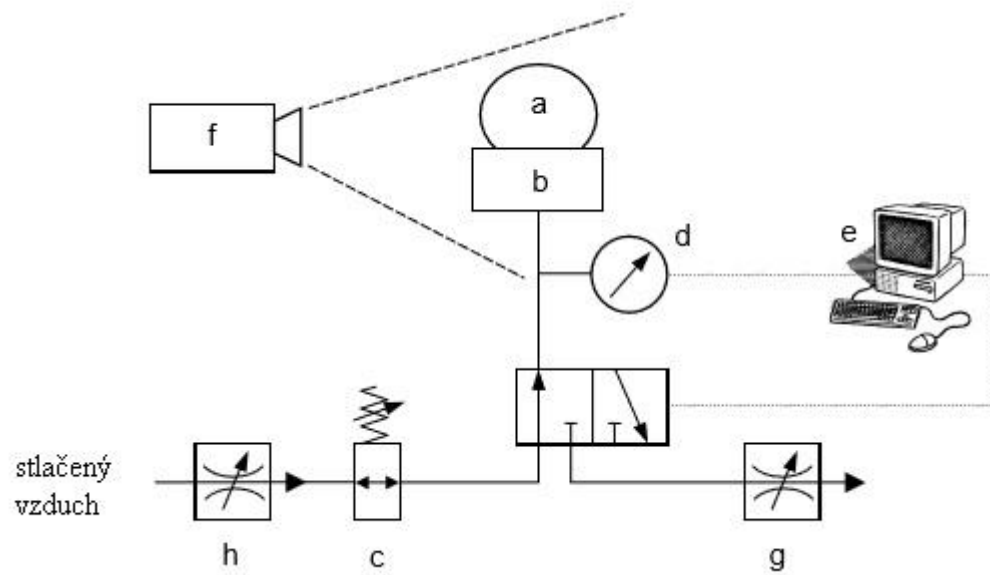
Nafukovaná tělíska byla kruhového tvaru o zkoušeném průměru 50 mm, na kterých byly nakresleny 2 proužky o vzdálenosti 10 mm.

4.2.3.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření probíhalo při laboratorní teplotě 24°C a laboratorních podmínkách.

4.2.3.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Bylo použito speciální zkušební zařízení, které bylo vyvinuto pro dané měření (obr. 14).



Obrázek 14: Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti

4.2.3.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zpracování výsledků probíhalo dle kapitoly 3.7.2 a výsledky byly zaznamenány do grafů a tabulek.

5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

5.1 MATERIÁL S1

5.1.1 Čistý smyk

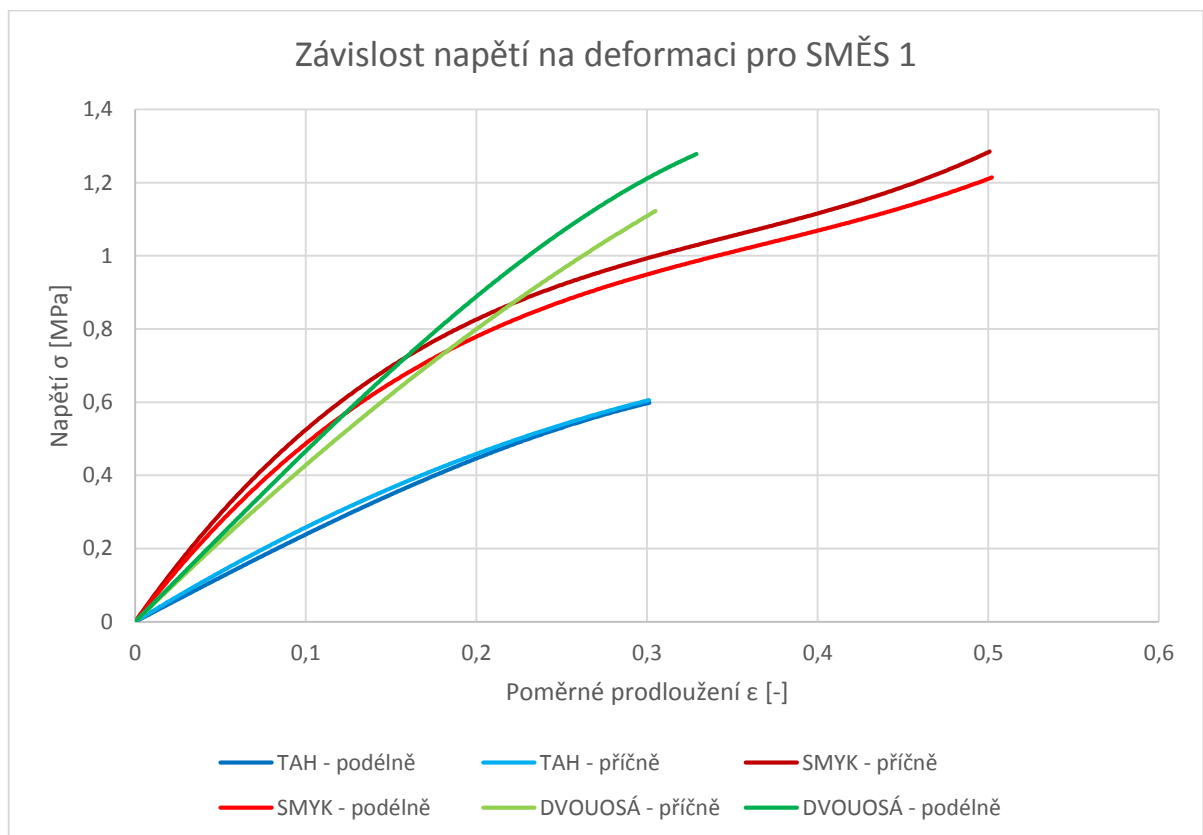
Napětí při poměrném protažení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném protažení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	0,9545	0,9465	0,9194	S1 Podélně	1,2041	1,1958	1,1586
S1 Příčně	1,0417	0,9921	0,9254	S1 Příčně	1,3165	1,2567	1,1853

Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 1

5.1.2 Dvousá napjatost

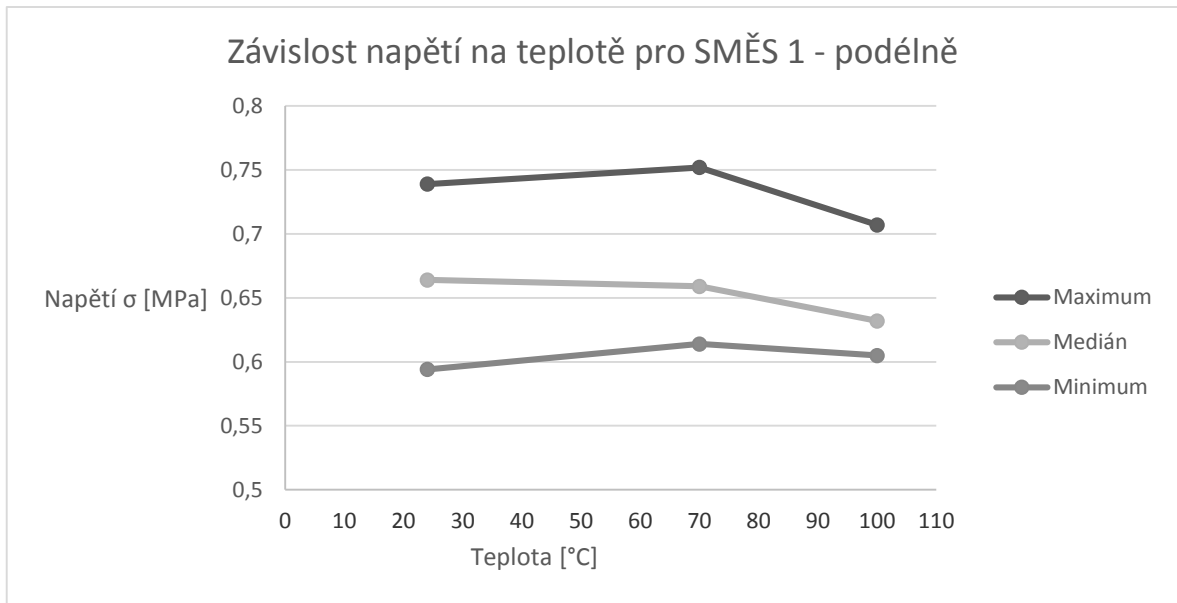
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S1	1,2937	1,2501	0,9852

Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 1

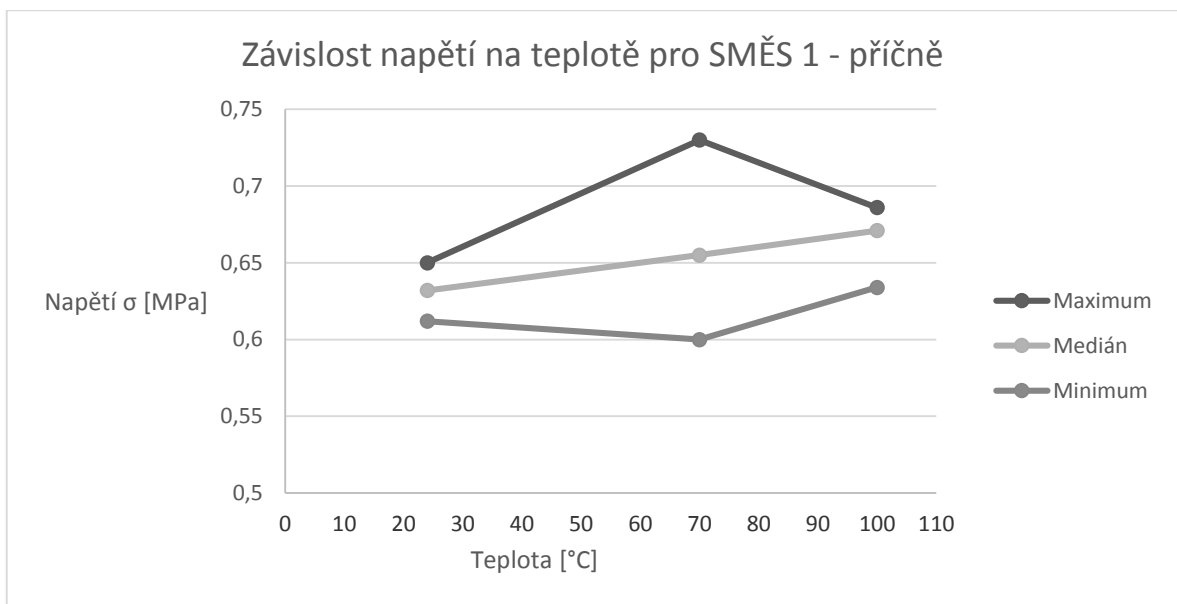


Obrázek 15: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 1

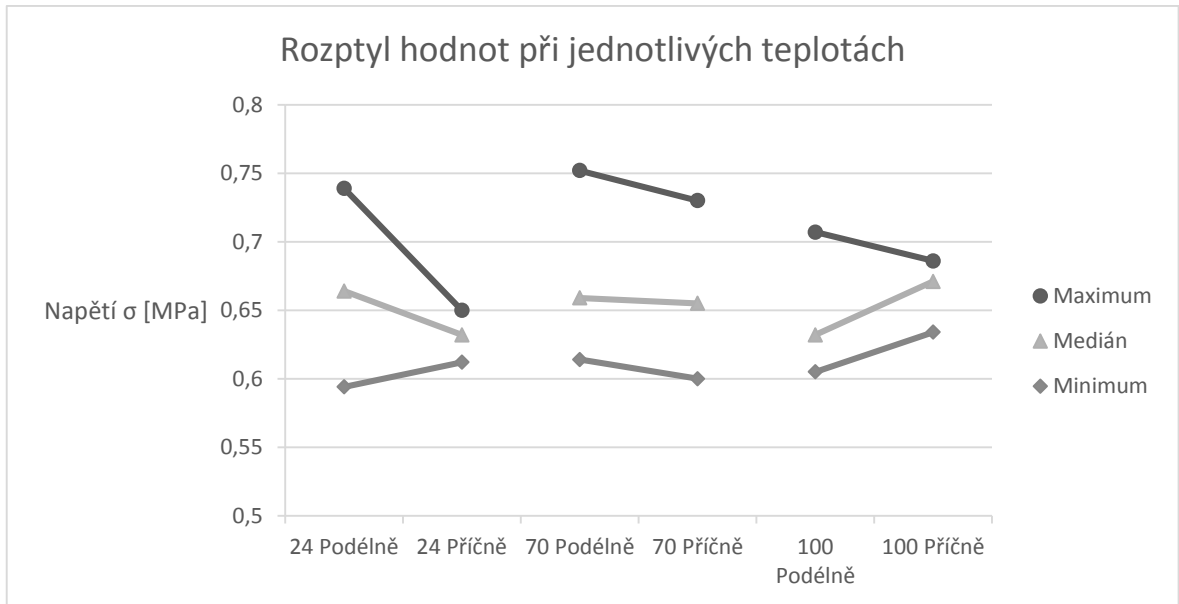
5.1.3 Tah



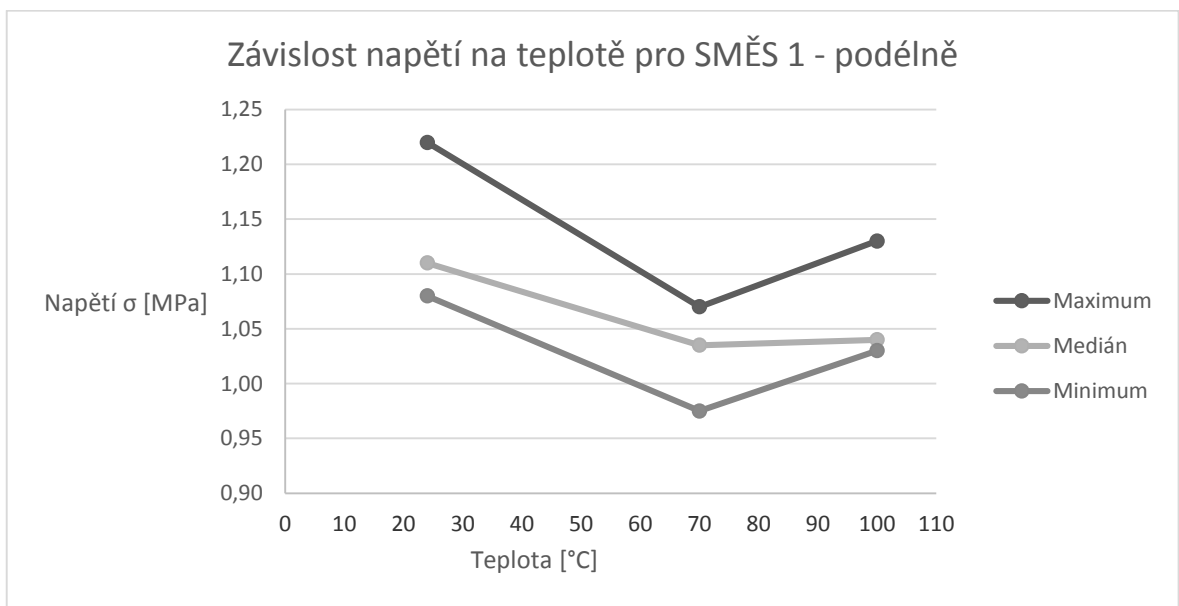
Obrázek 16: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



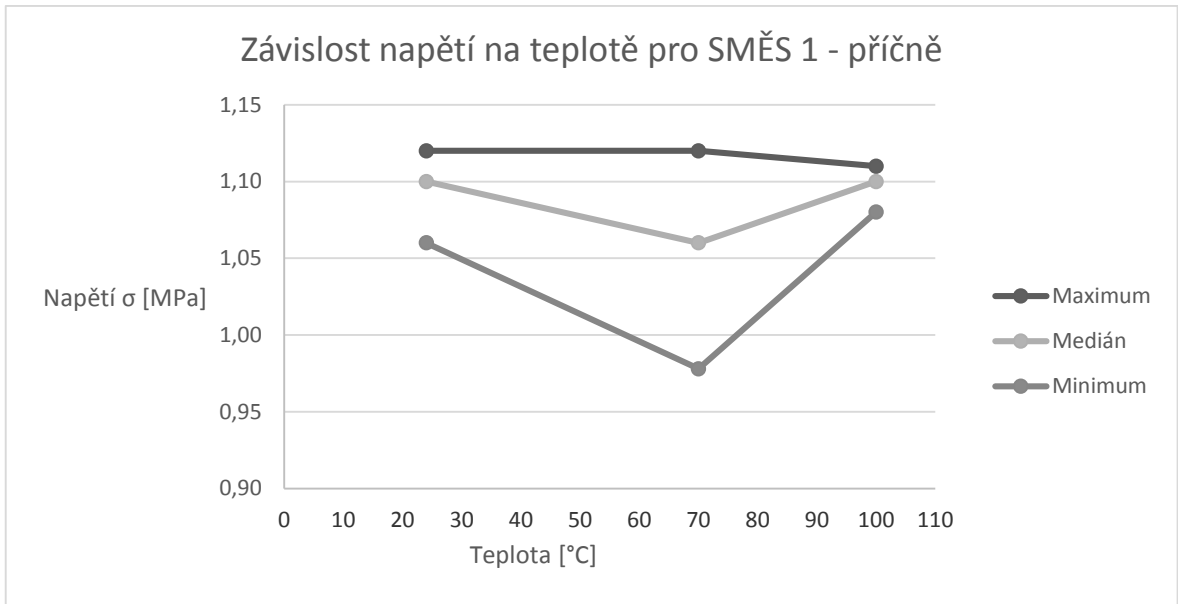
Obrázek 17: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



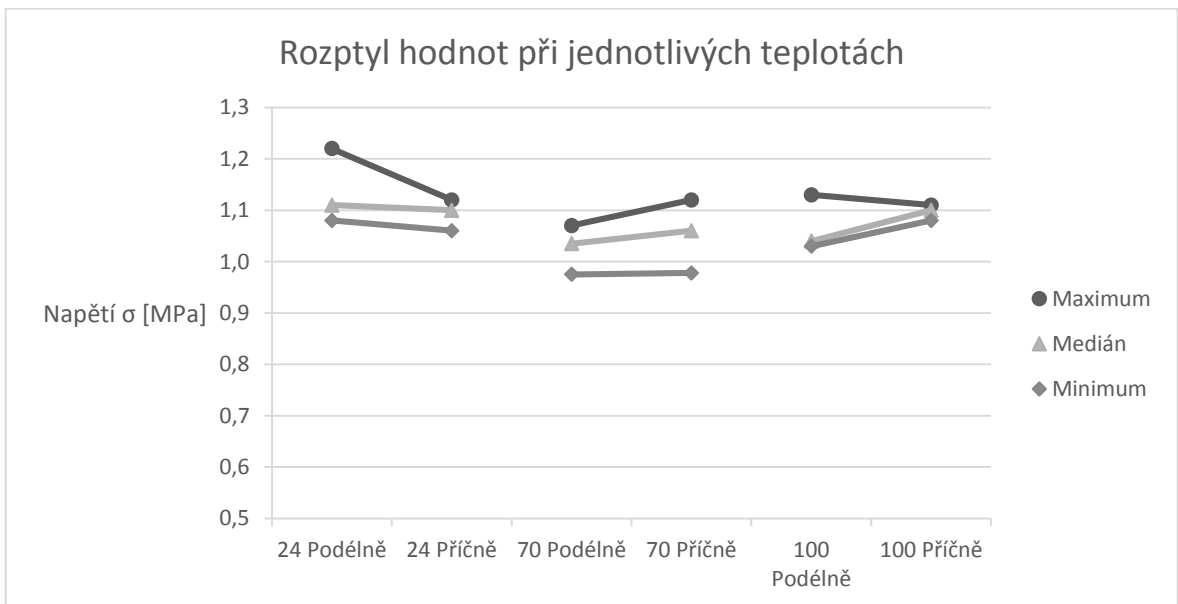
Obrázek 18: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 19: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 20: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 21: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	0,739	0,664	0,594
S1 Příčně	0,650	0,632	0,612
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	0,752	0,659	0,614
S1 Příčně	0,730	0,655	0,600
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	0,707	0,632	0,605
S1 Příčně	0,686	0,671	0,634

Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 1 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	1,220	1,110	1,080
S1 Příčně	1,120	1,100	1,060
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	1,070	1,035	0,975
S1 Příčně	1,120	1,060	0,978
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S1 Podélně	1,130	1,040	1,030
S1 Příčně	1,110	1,100	1,080

Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 1 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$

5.2 MATERIÁL S2

5.2.1 Čistý smyk

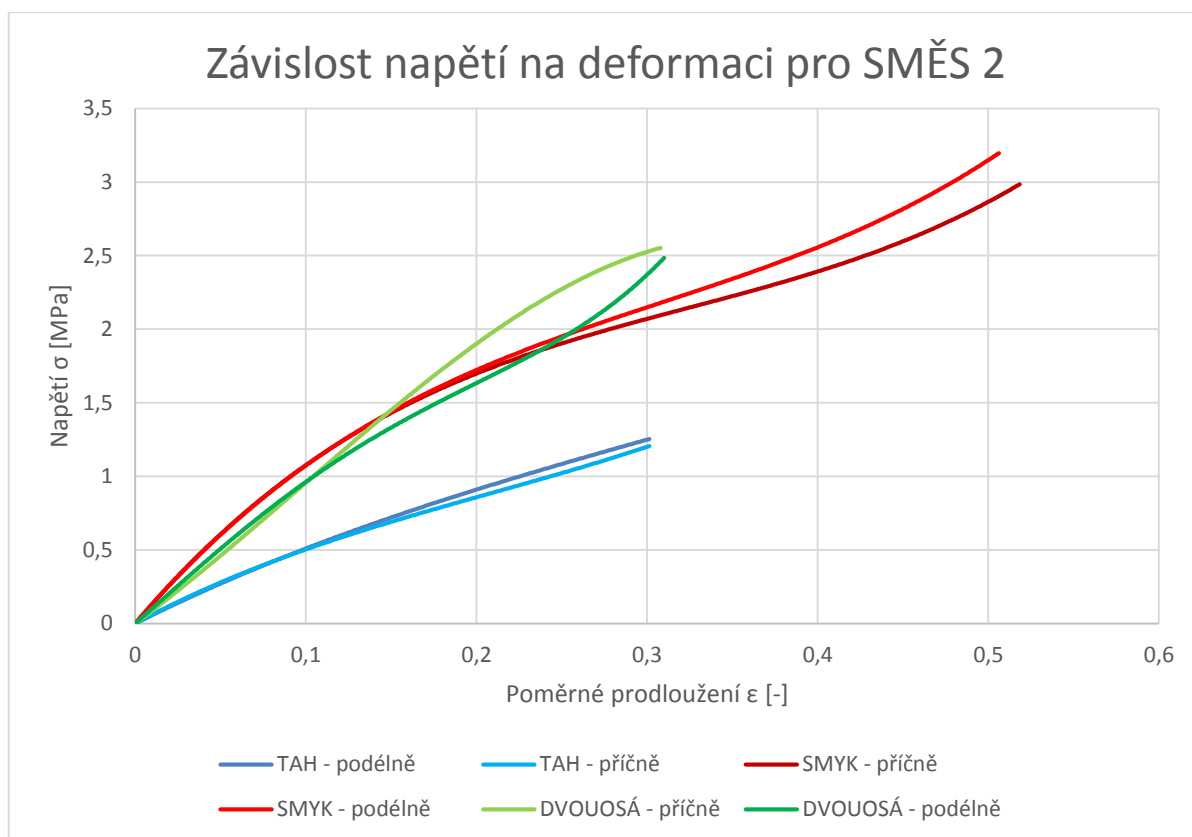
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	2,1940	2,1503	2,1399	S2 Podélně	3,1205	3,0924	2,9797
S2 Příčně	2,1457	2,0489	2,0184	S2 Příčně	2,8230	2,8119	2,8009

Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 2

5.2.2 Dvousá napjatost

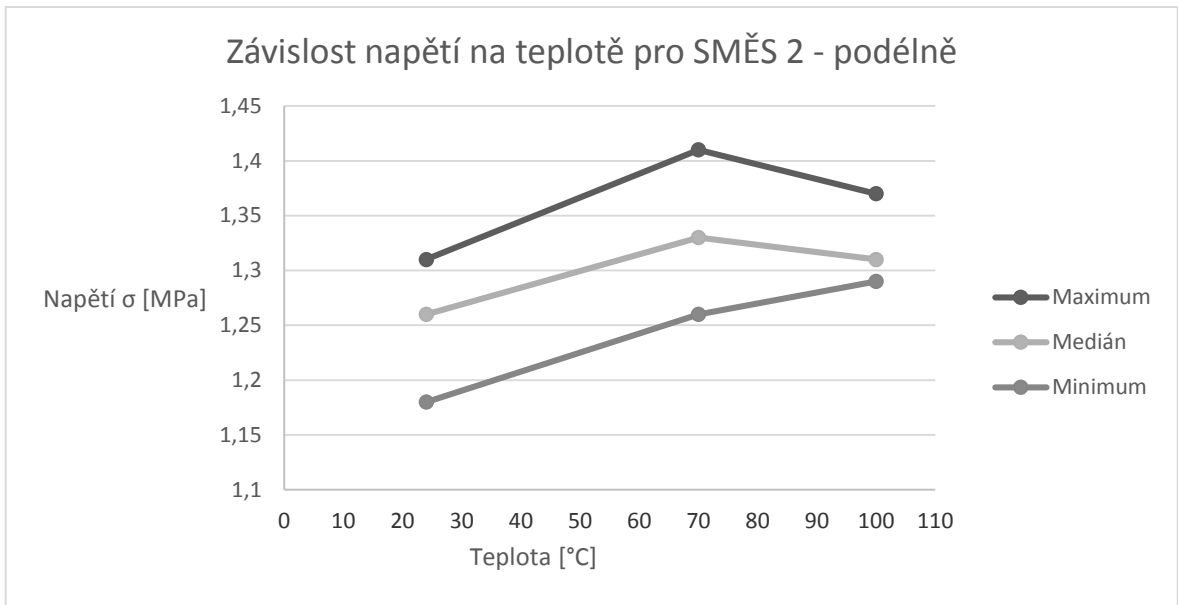
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S2	2,5648	2,5094	2,4242

Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 2

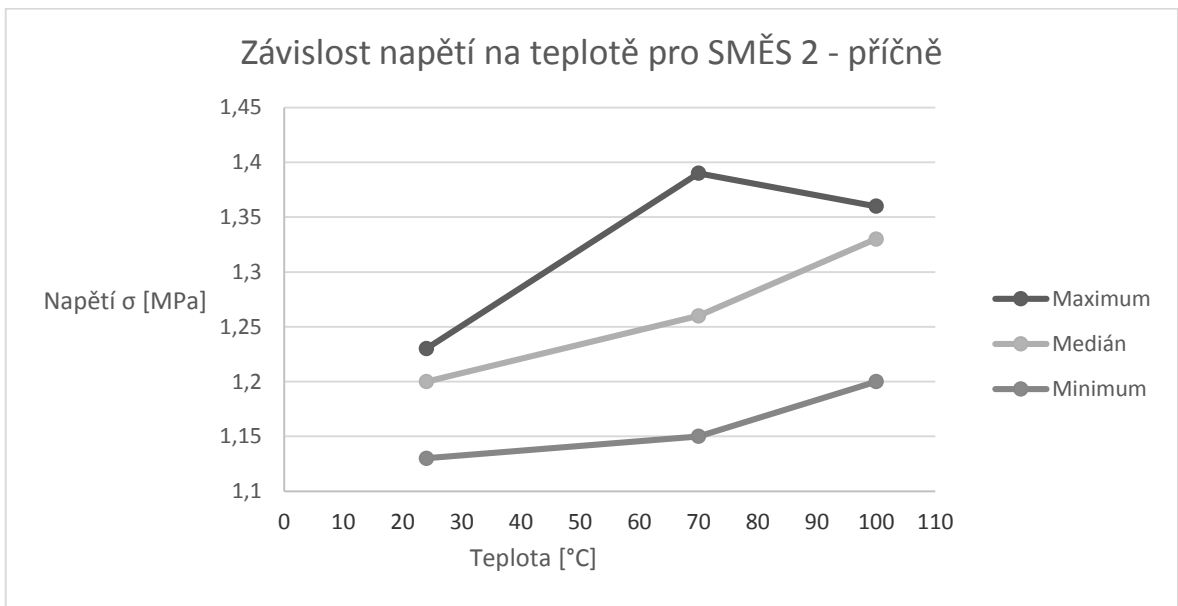


Obrázek 22: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 2

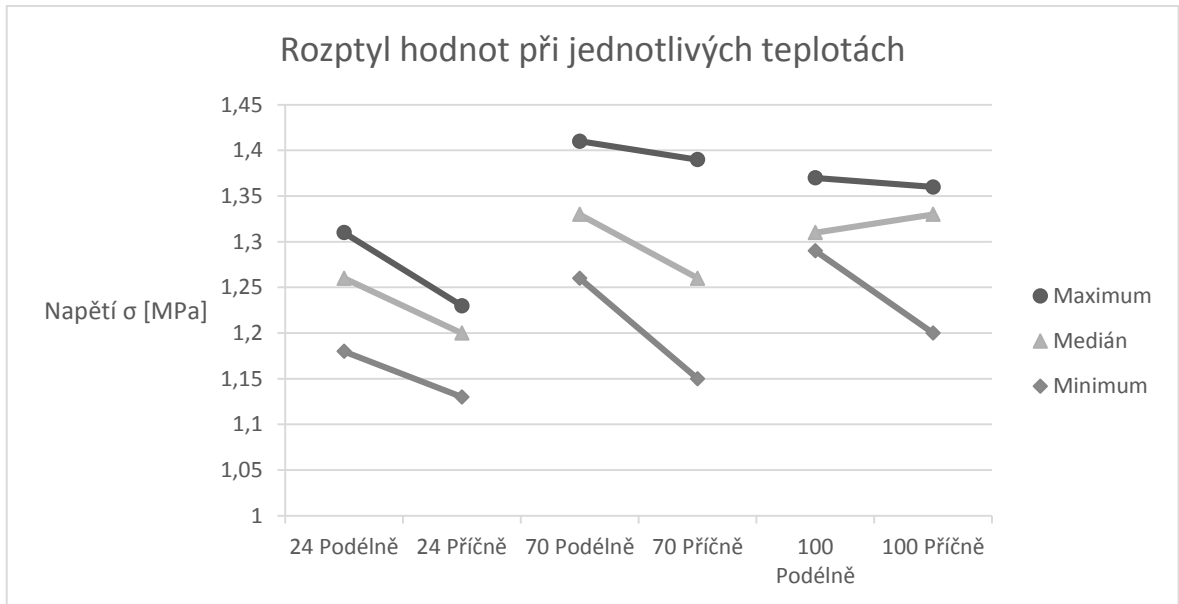
5.2.3 Tah



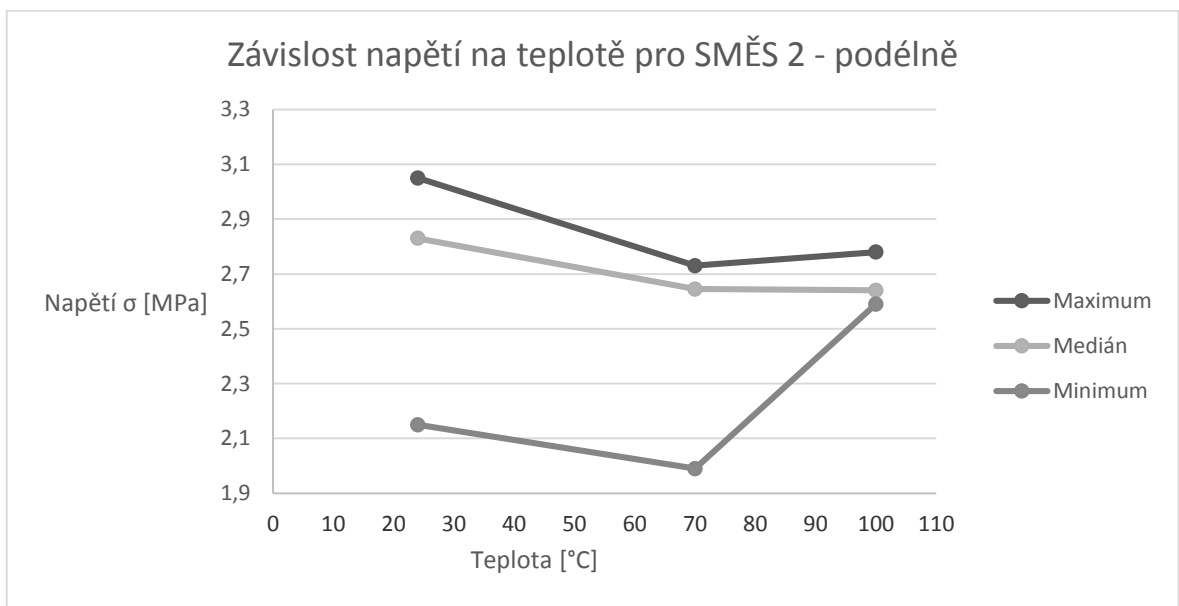
Obrázek 23: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



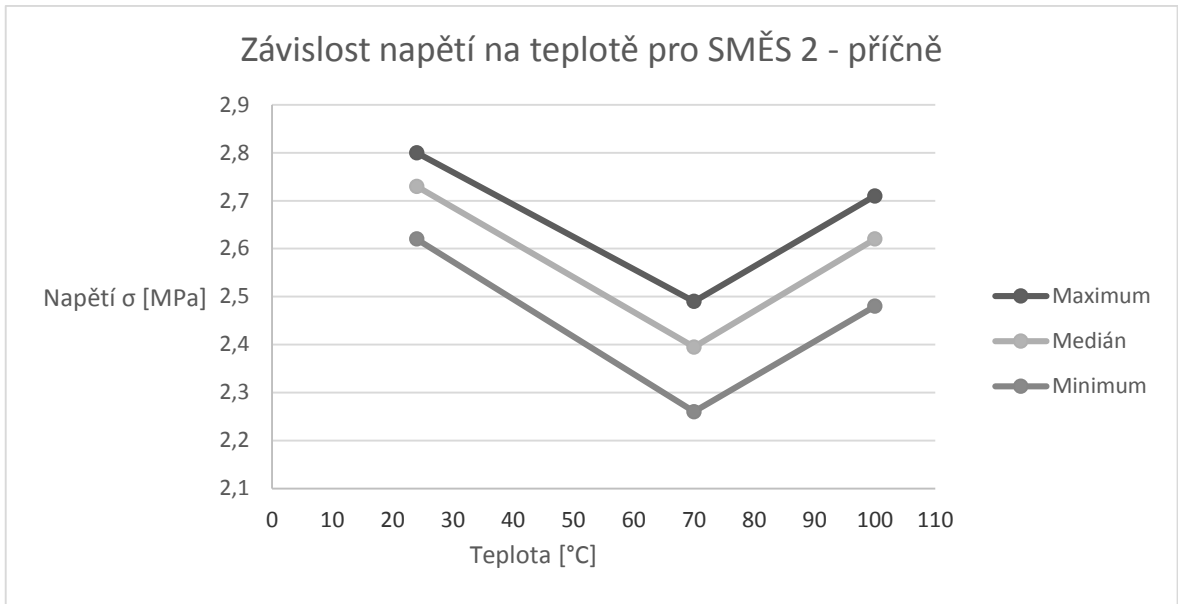
Obrázek 24: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



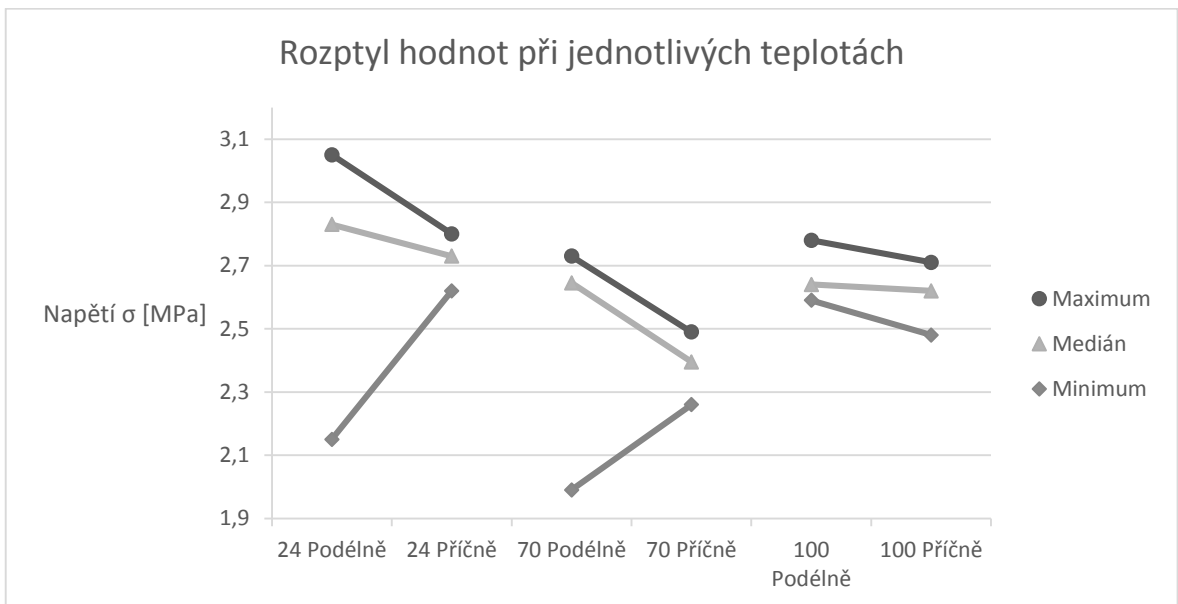
Obrázek 25: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 26: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 27: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 28: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	1,310	1,260	1,180
S2 Příčně	1,230	1,200	1,130
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	1,410	1,330	1,260
S2 Příčně	1,390	1,260	1,150
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	1,370	1,310	1,290
S2 Příčně	1,360	1,330	1,200

Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 2 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	3,050	2,830	2,150
S2 Příčně	2,800	2,730	2,620
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	2,730	2,645	1,990
S2 Příčně	2,490	2,395	2,260
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S2 Podélně	2,780	2,640	2,590
S2 Příčně	2,710	2,620	2,480

Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 2 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$

5.3 MATERIÁL S3

5.3.1 Čistý smyk

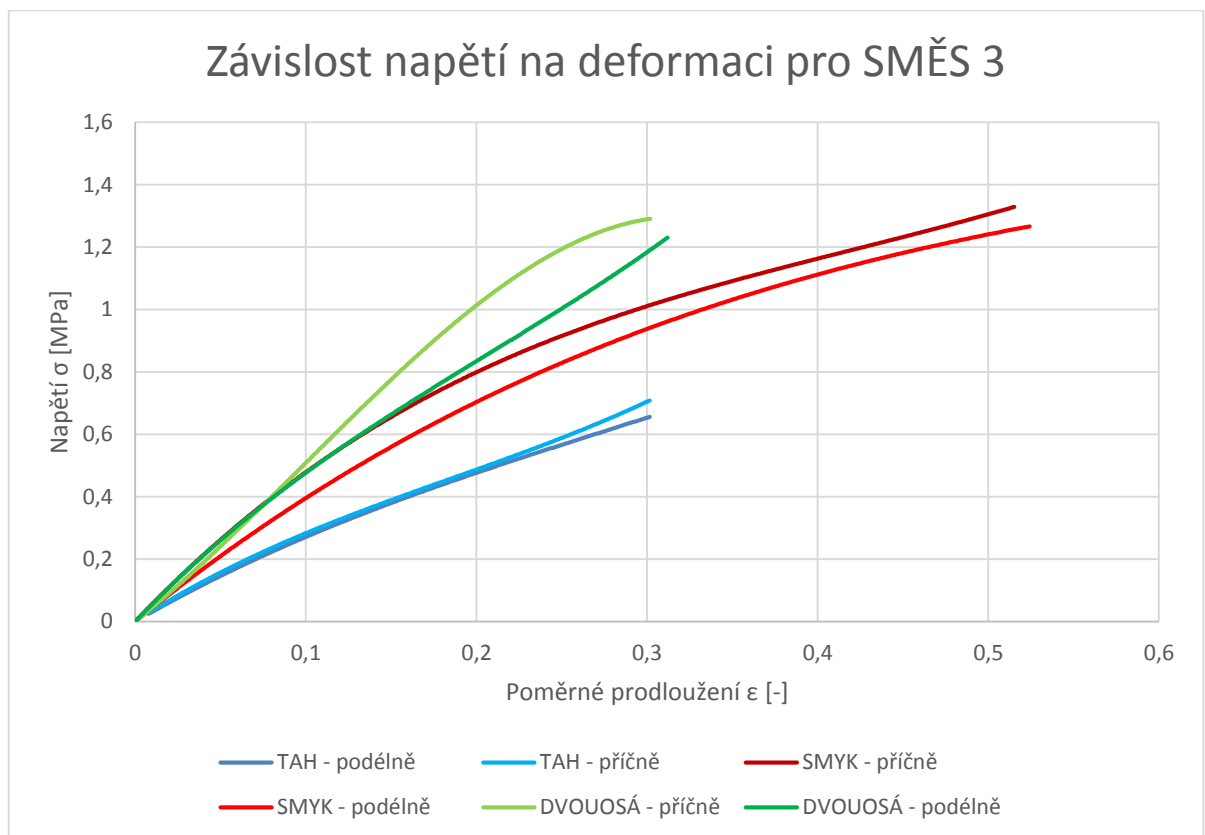
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	1,0281	0,9386	0,9060	S3 Podélně	1,3515	1,2446	1,2227
S3 Příčně	1,0087	0,9567	0,9399	S3 Příčně	1,3066	1,2474	1,2457

Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 3

5.3.2 Dvousá napjatost

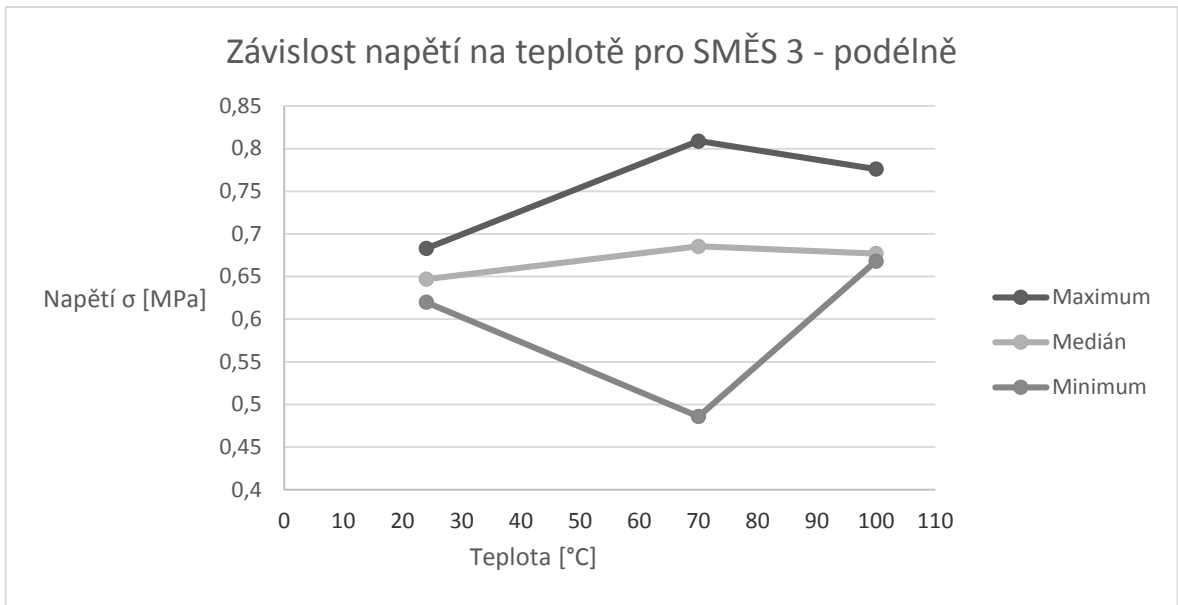
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S3	1,3478	1,2964	1,2410

Tabulka 14: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 3

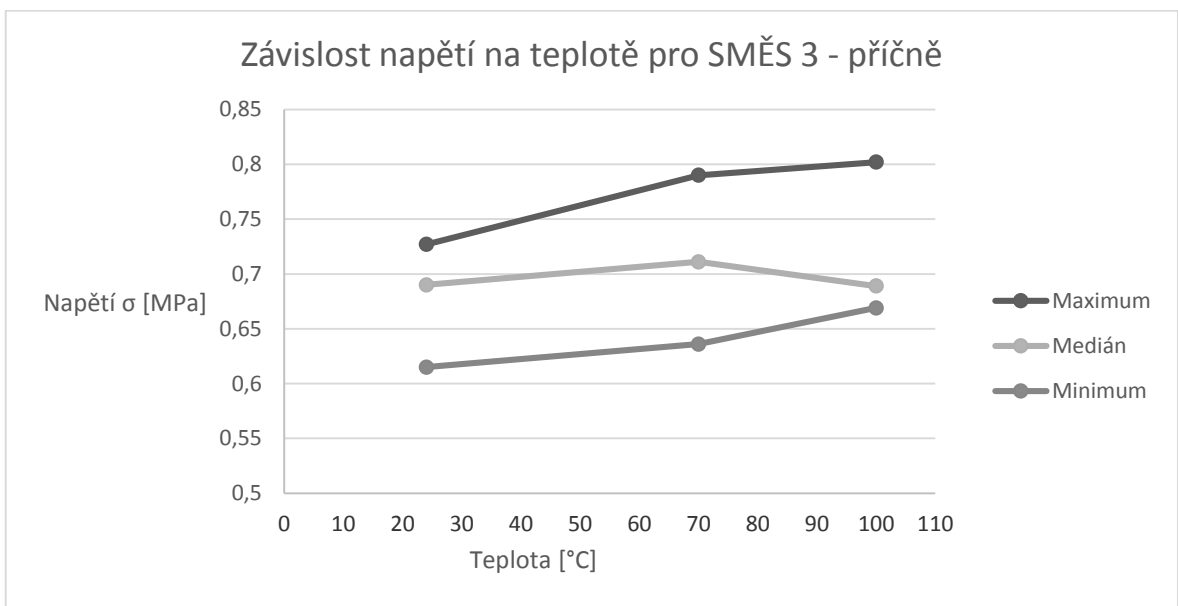


Obrázek 29: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 3

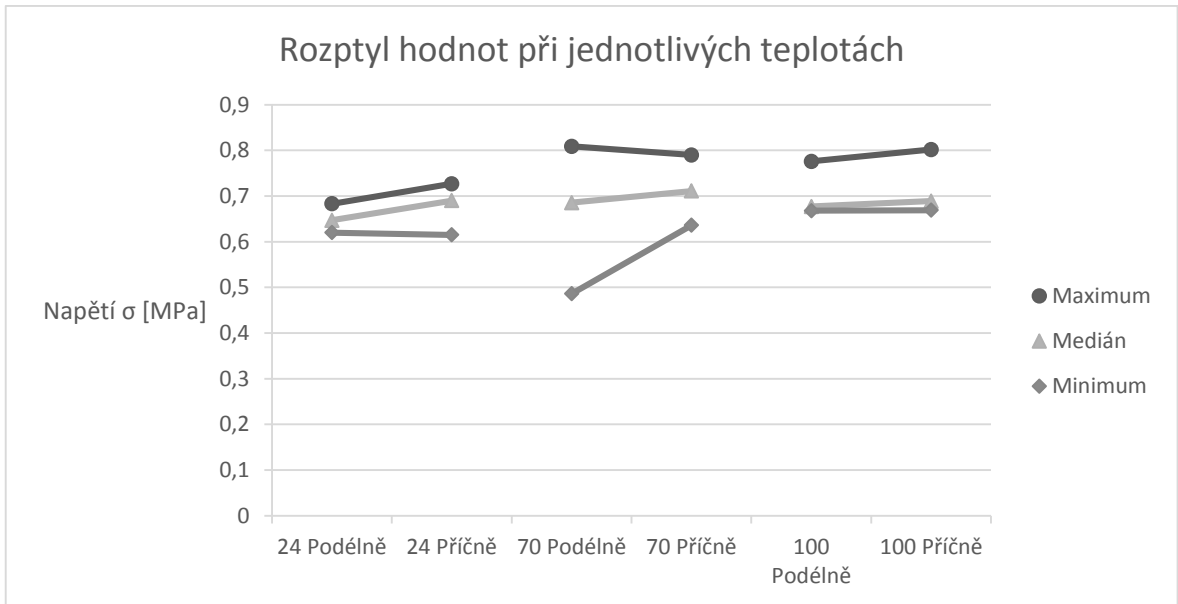
5.3.3 Tah



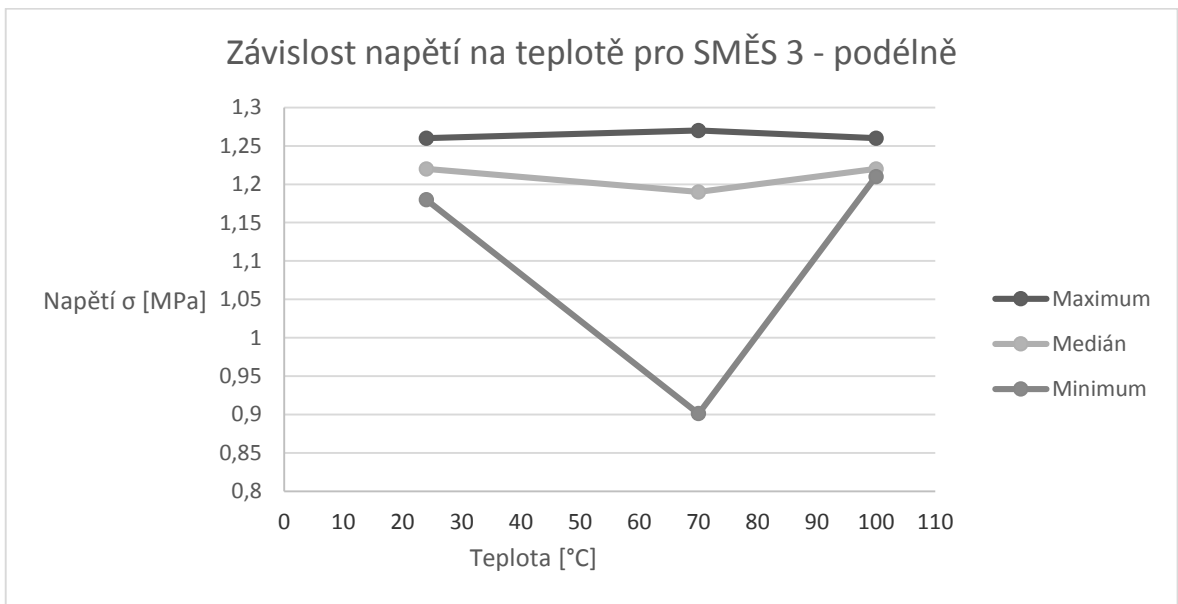
Obrázek 30: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



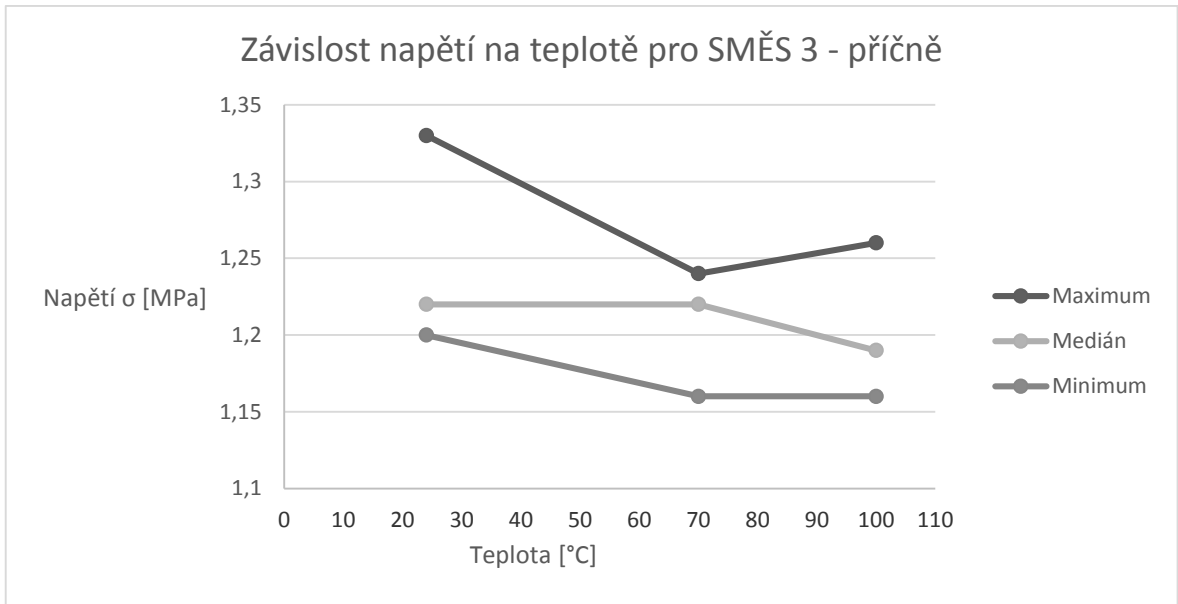
Obrázek 31: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



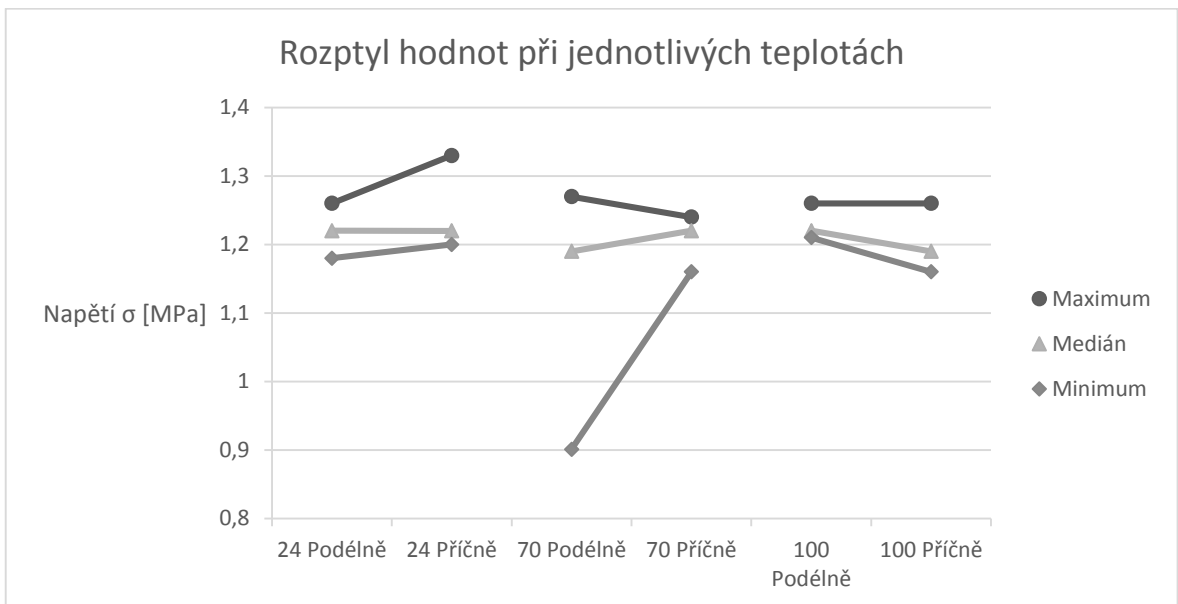
Obrázek 32: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 33: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 34: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 35: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	0,683	0,647	0,620
S3 Příčně	0,727	0,690	0,615
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	0,809	0,686	0,486
S3 Příčně	0,790	0,711	0,636
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	0,776	0,677	0,668
S3 Příčně	0,802	0,689	0,669

Tabulka 15: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 3 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	1,260	1,220	1,180
S3 Příčně	1,330	1,220	1,200
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	1,270	1,190	0,901
S3 Příčně	1,240	1,220	1,160
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S3 Podélně	1,260	1,220	1,210
S3 Příčně	1,260	1,190	1,160

Tabulka 16: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 3 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

5.4 MATERIÁL S4

5.4.1 Čistý smyk

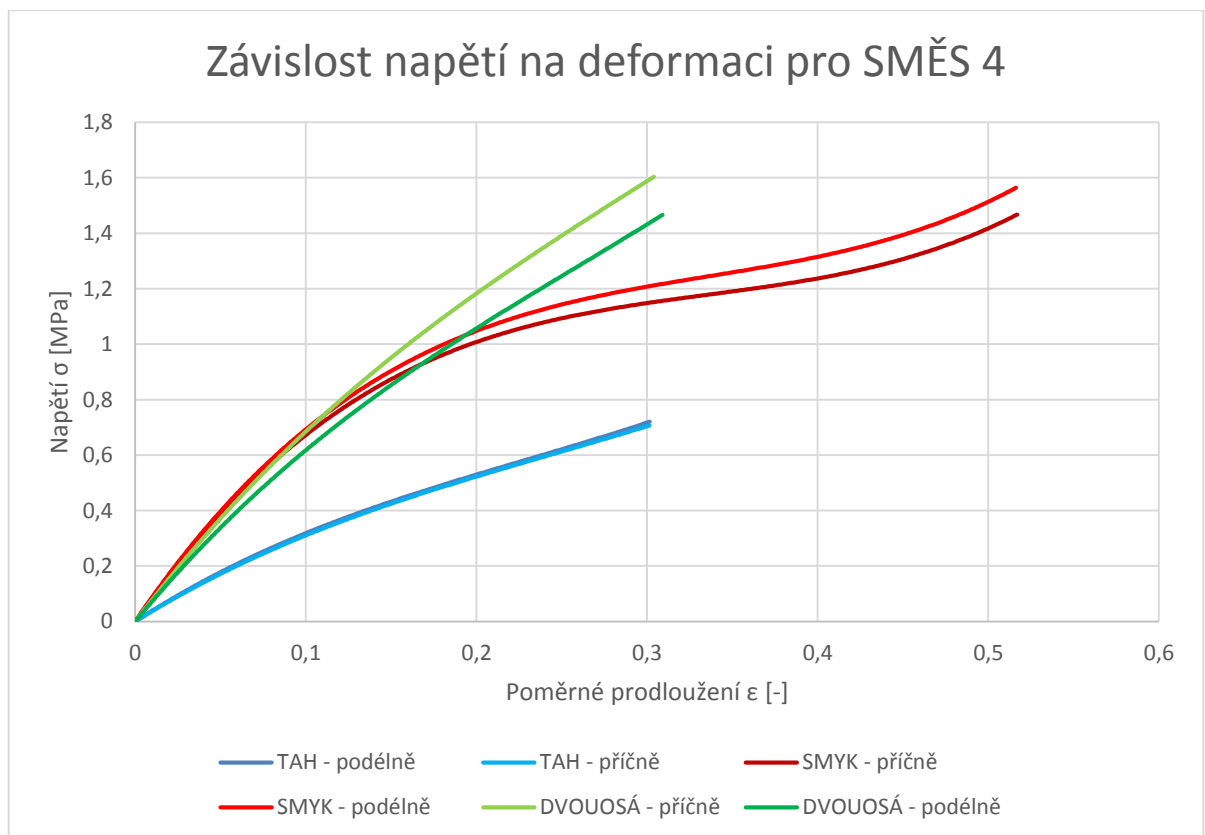
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	1,1985	1,1914	1,0851	S4 Podélně	1,4866	1,4709	1,3632
S4 Příčně	1,1521	1,1448	1,1290	S4 Příčně	1,4186	1,3962	1,3894

Tabulka 17: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 4

5.4.2 Dvousá napjatost

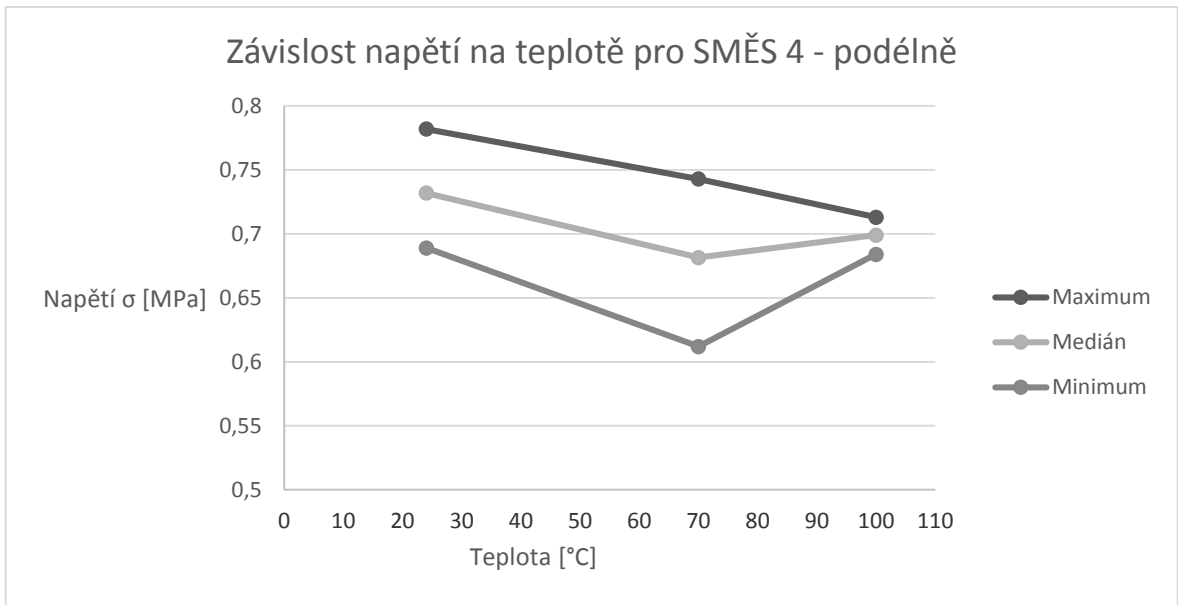
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S4	1,5727	1,4486	1,4464

Tabulka 18: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 4

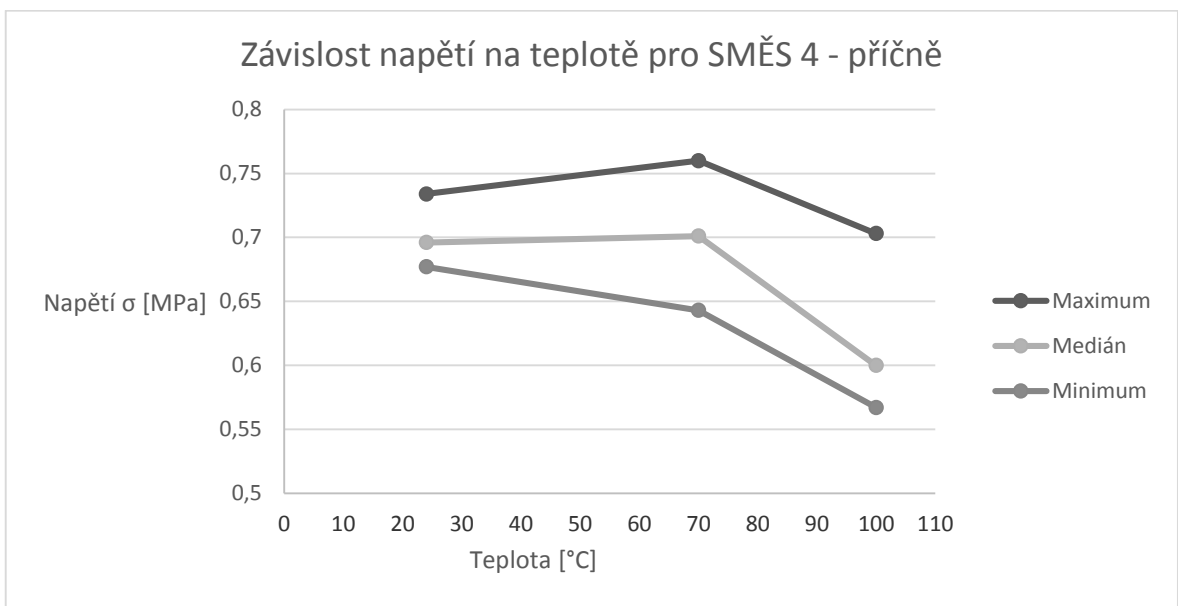


Obrázek 36: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 4

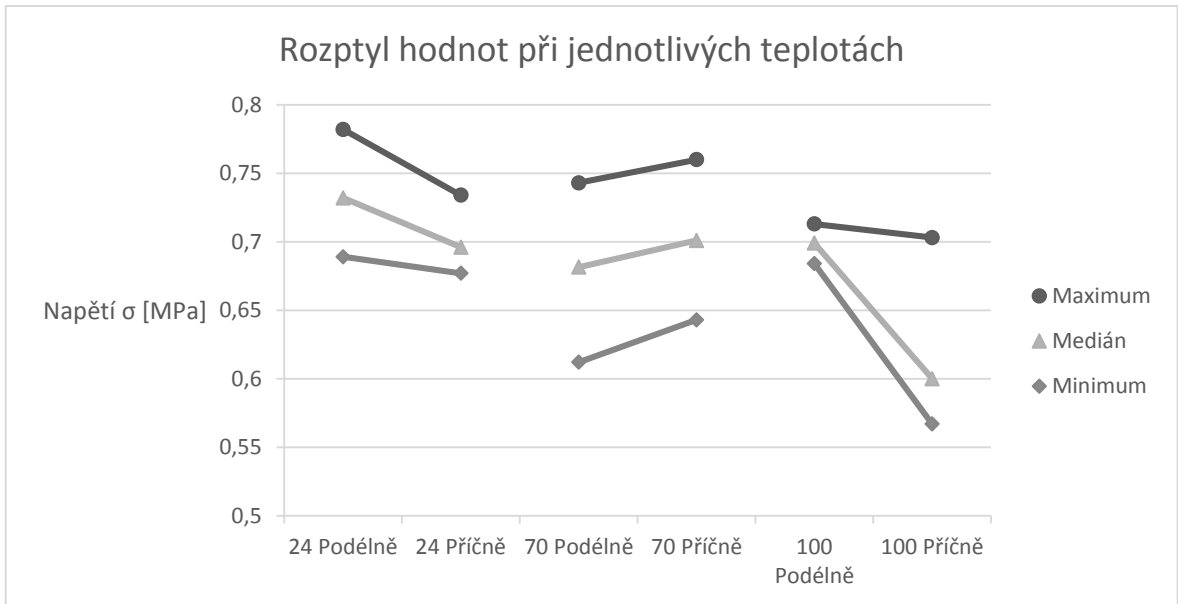
5.4.3 Tah



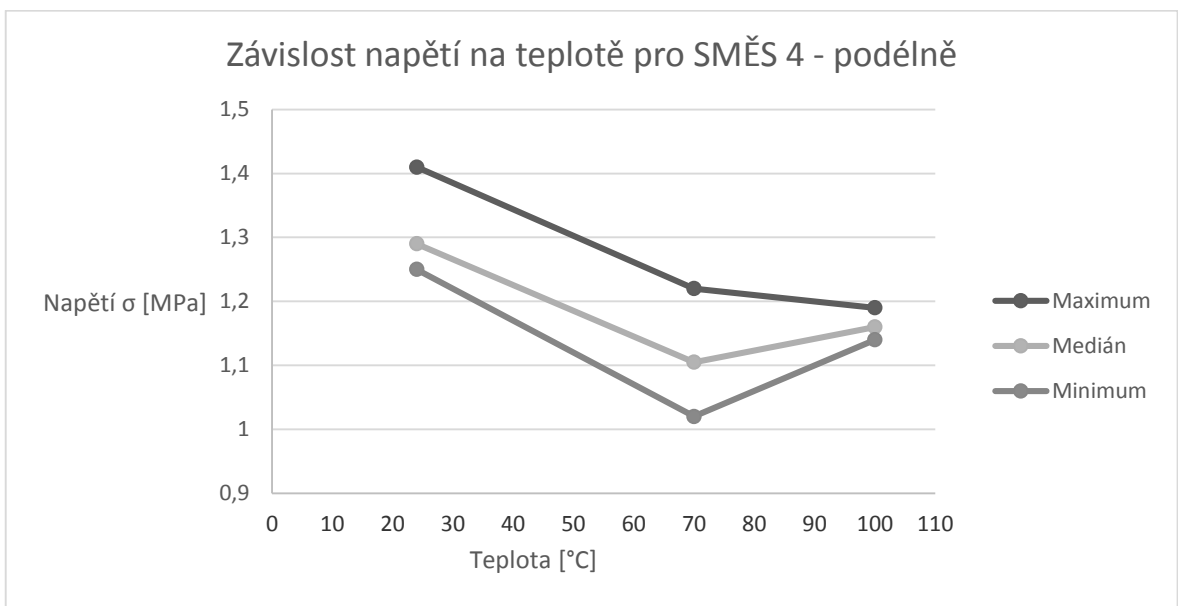
Obrázek 37: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



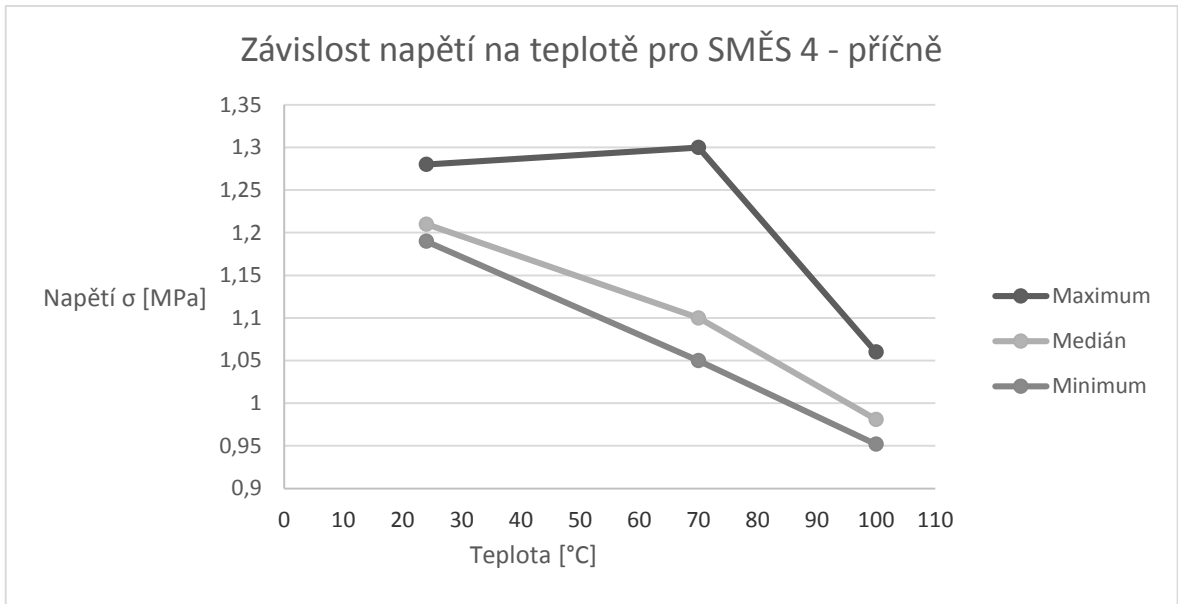
Obrázek 38: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



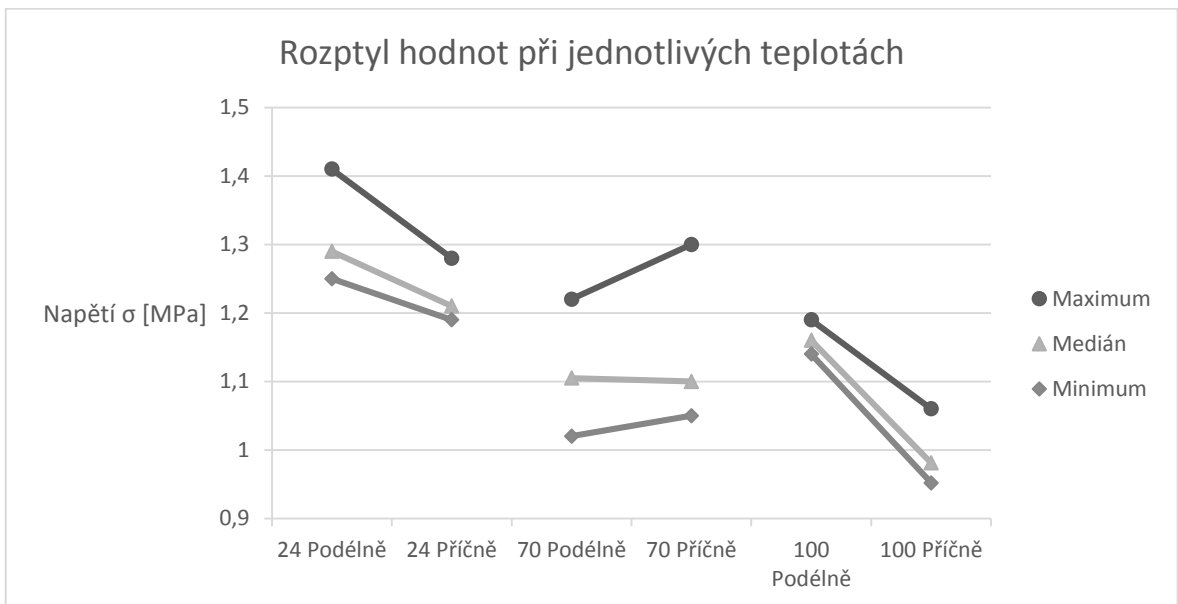
Obrázek 39: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 40: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 41: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 42: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	0,782	0,732	0,689
S4 Příčně	0,734	0,696	0,677
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	0,743	0,682	0,612
S4 Příčně	0,760	0,701	0,643
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	0,713	0,699	0,684
S4 Příčně	0,703	0,600	0,567

Tabulka 19: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 4 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	1,410	1,290	1,250
S4 Příčně	1,280	1,210	1,190
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	1,220	1,105	1,020
S4 Příčně	1,300	1,100	1,050
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S4 Podélně	1,190	1,160	1,140
S4 Příčně	1,060	0,981	0,952

Tabulka 20: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 4 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$

5.5 MATERIÁL S5

5.5.1 Čistý smyk

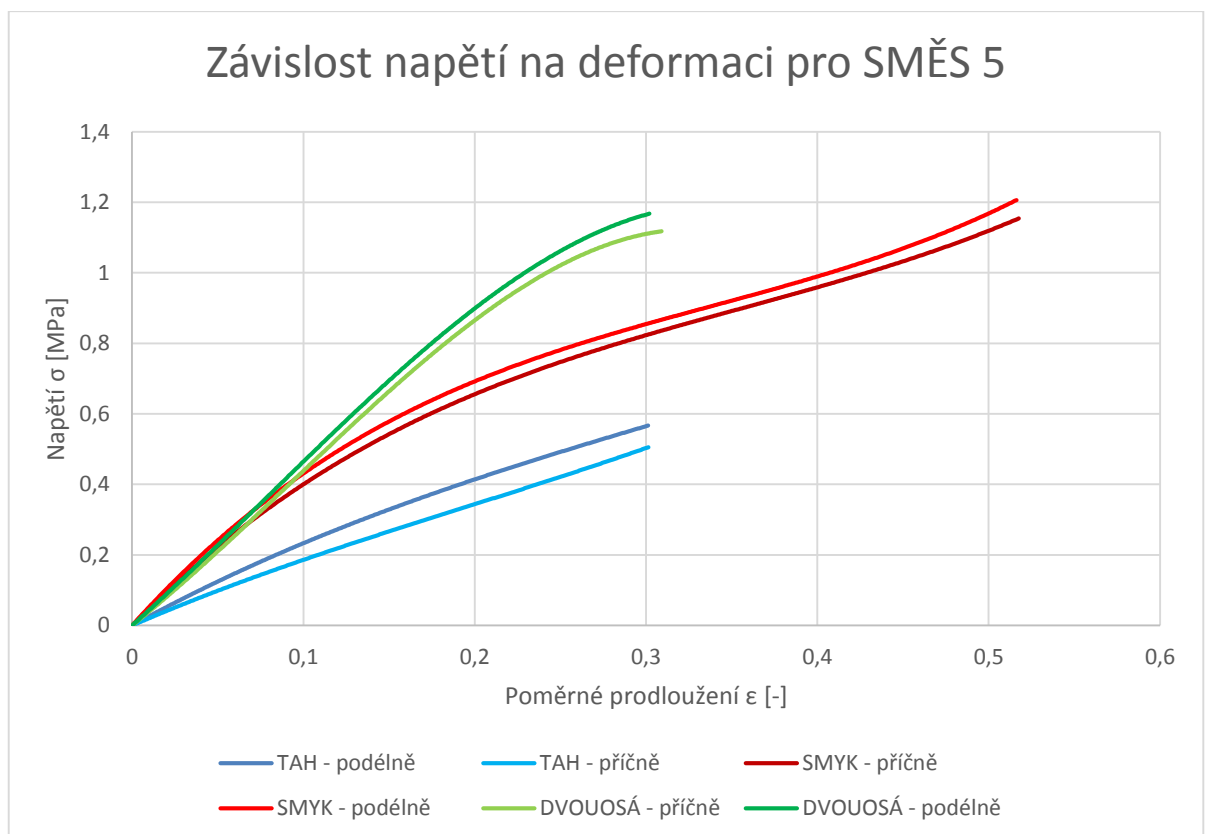
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	0,8510	0,8472	0,7904	S5 Podélně	1,1568	1,1502	1,0932
S5 Příčně	0,8377	0,8239	0,8219	S5 Příčně	1,1269	1,1139	1,1108

Tabulka 21: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 5

5.5.2 Dvousá napjatost

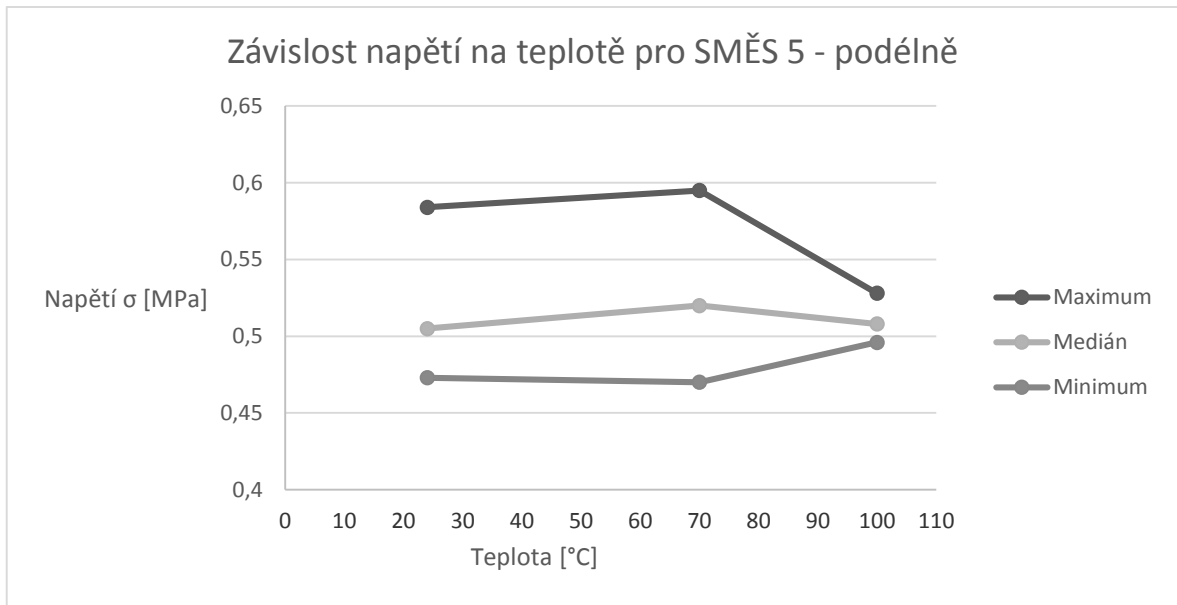
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S5	1,1838	1,1716	1,1346

Tabulka 22: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 5

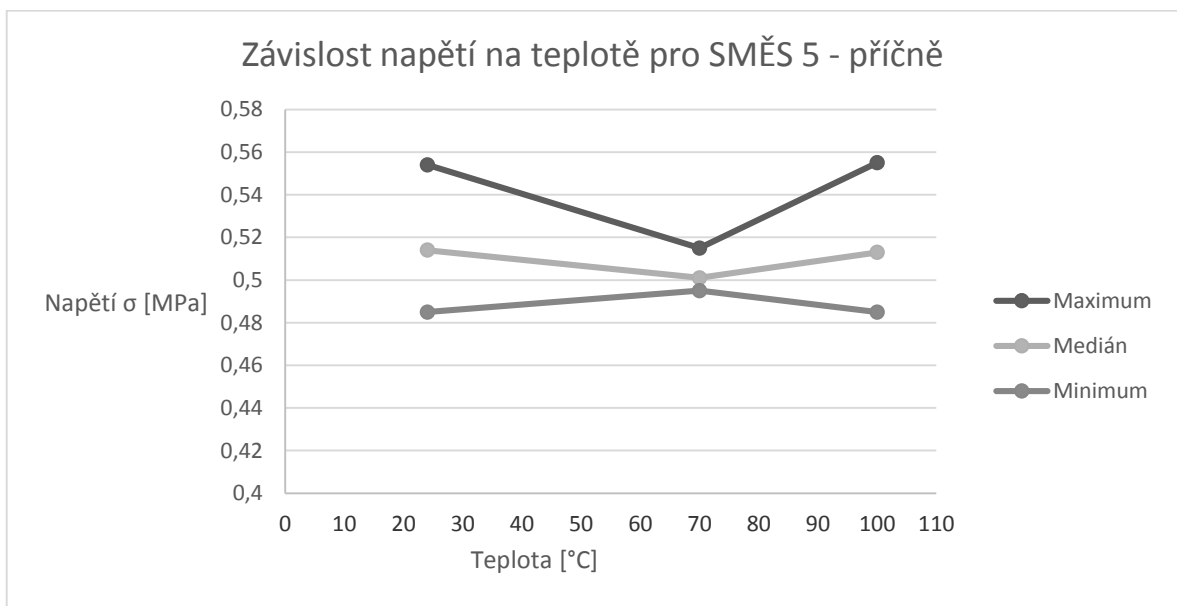


Obrázek 43: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 5

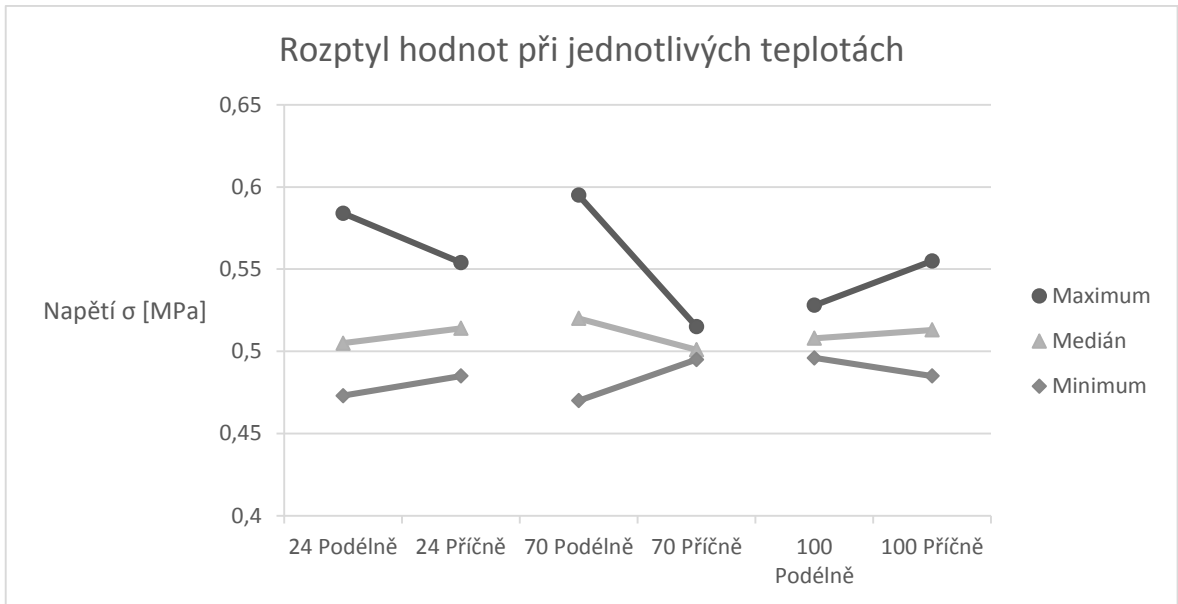
5.5.3 Tah



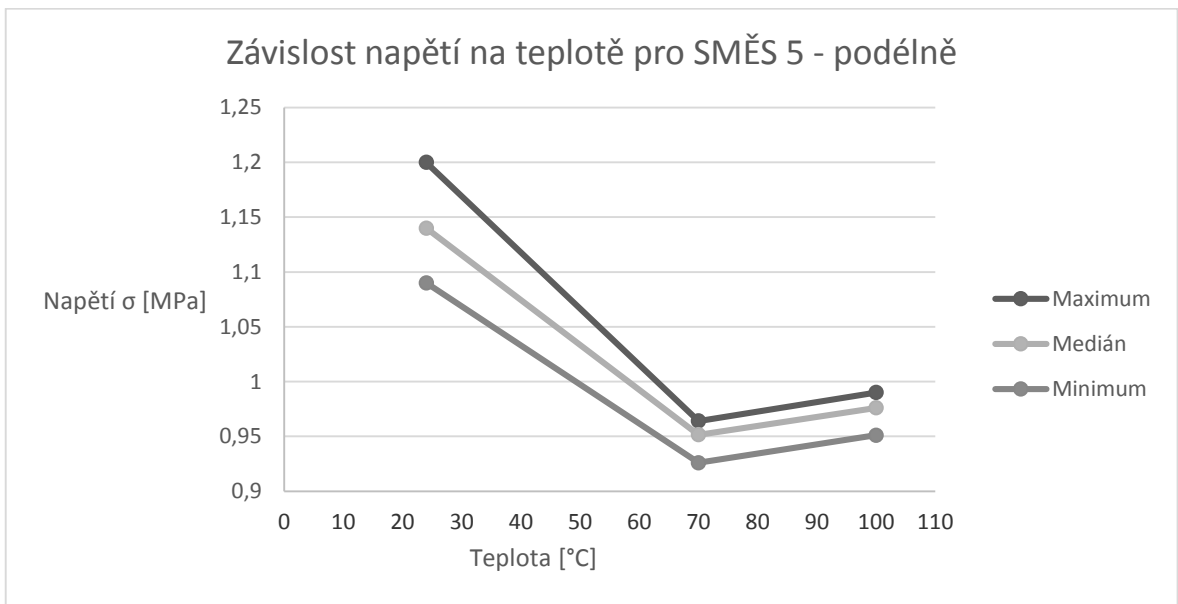
Obrázek 44: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



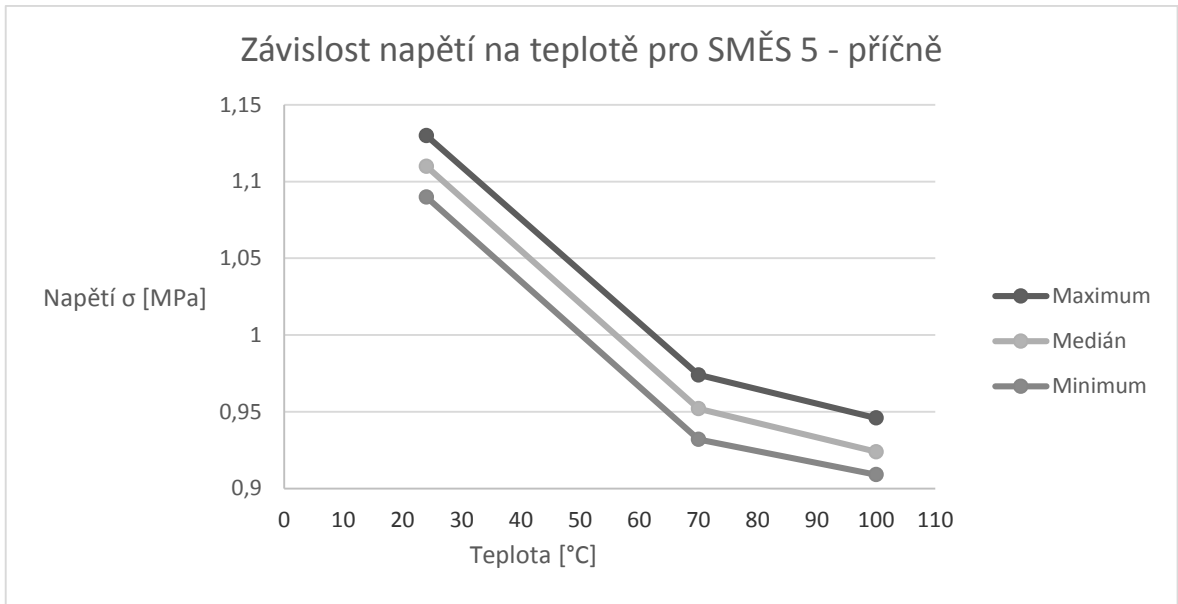
Obrázek 45: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



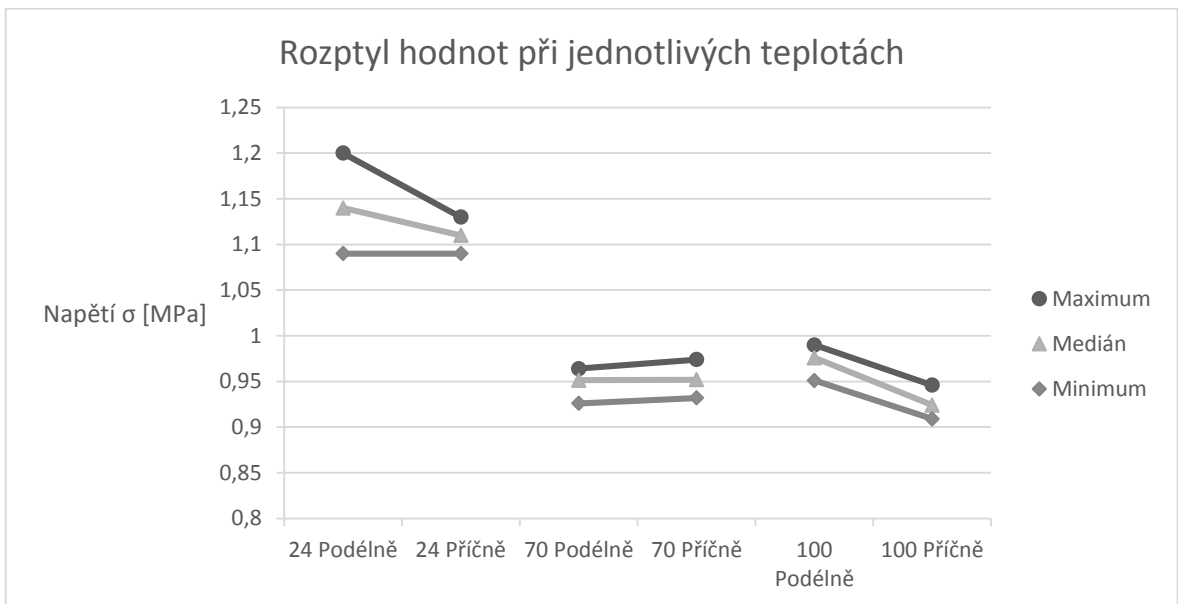
Obrázek 46: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 47: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 48: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 49: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	0,584	0,505	0,473
S5 Příčně	0,554	0,514	0,485
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	0,595	0,520	0,470
S5 Příčně	0,515	0,501	0,495
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	0,528	0,508	0,496
S5 Příčně	0,555	0,513	0,485

Tabulka 23: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 5 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	1,200	1,140	1,090
S5 Příčně	1,130	1,110	1,090
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	0,964	0,952	0,926
S5 Příčně	0,974	0,952	0,932
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S5 Podélně	0,990	0,976	0,951
S5 Příčně	0,946	0,924	0,909

Tabulka 24: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 5 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$

5.6 MATERIÁL S6

5.6.1 Čistý smyk

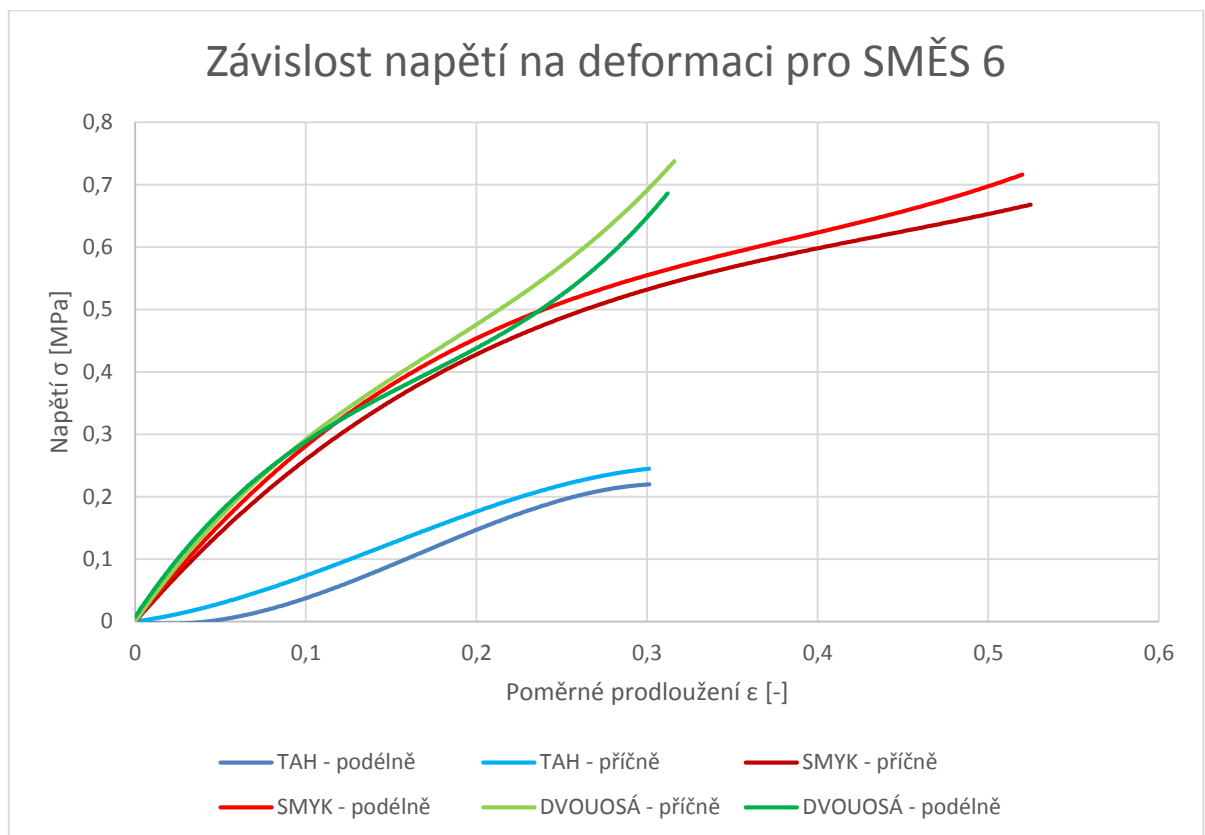
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,6367	0,5491	0,5302	S6 Podélně	0,9725	0,6992	0,6772
S6 Příčně	0,5670	0,5322	0,4847	S6 Příčně	0,7257	0,6538	0,5987

Tabulka 25: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 6

5.6.2 Dvousá napjatost

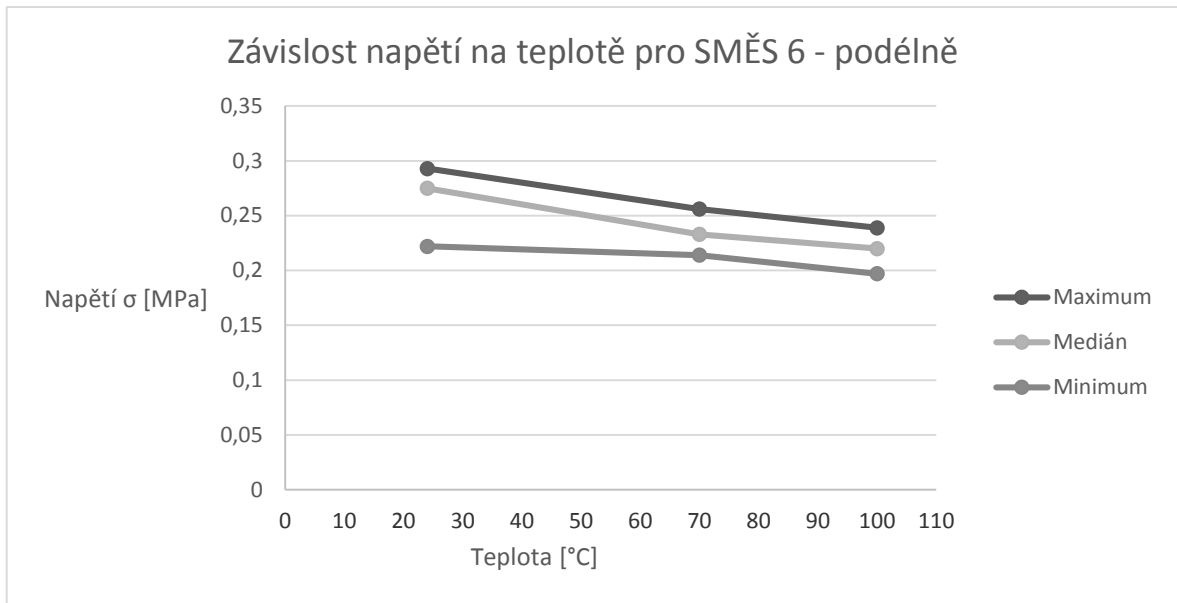
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S6	0,7167	0,6772	0,6729

Tabulka 26: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 6

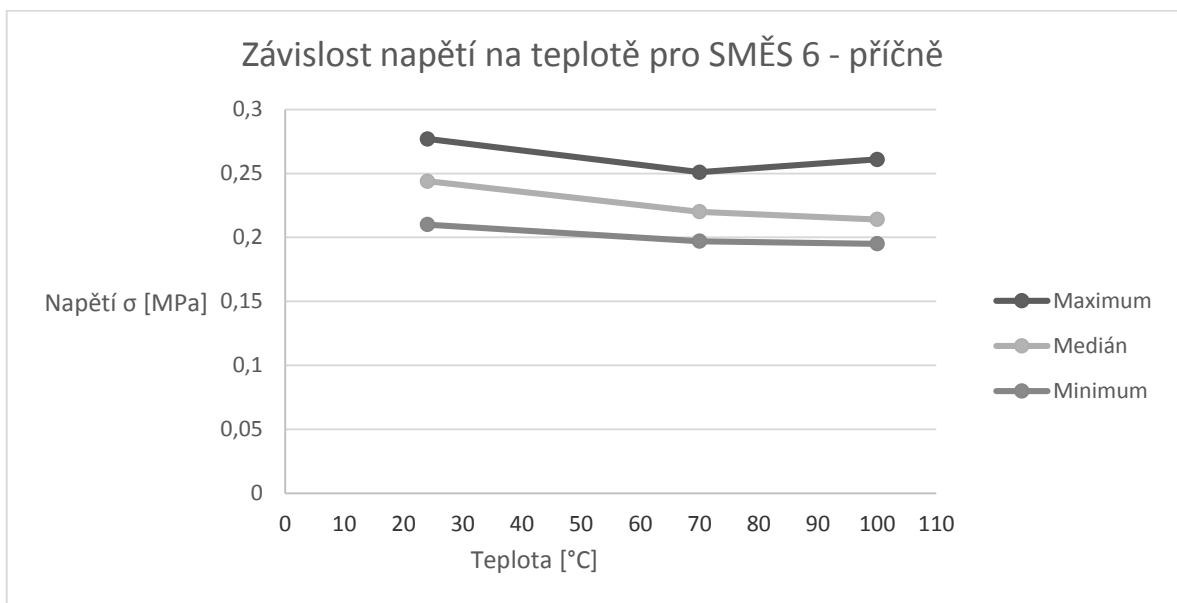


Obrázek 50: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 6

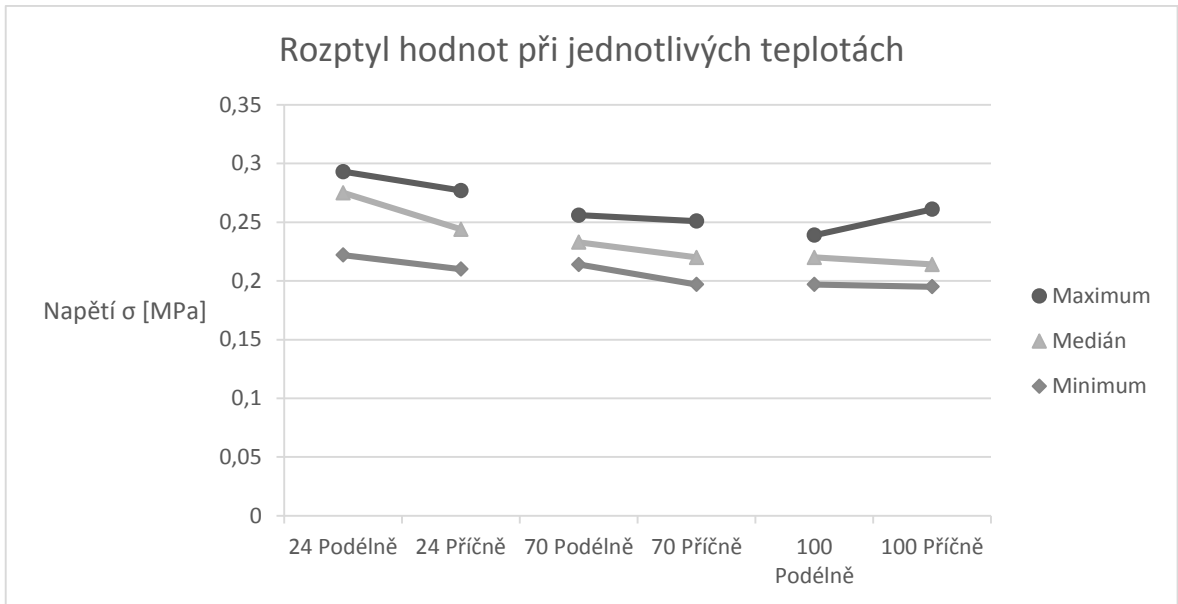
5.6.3 Tah



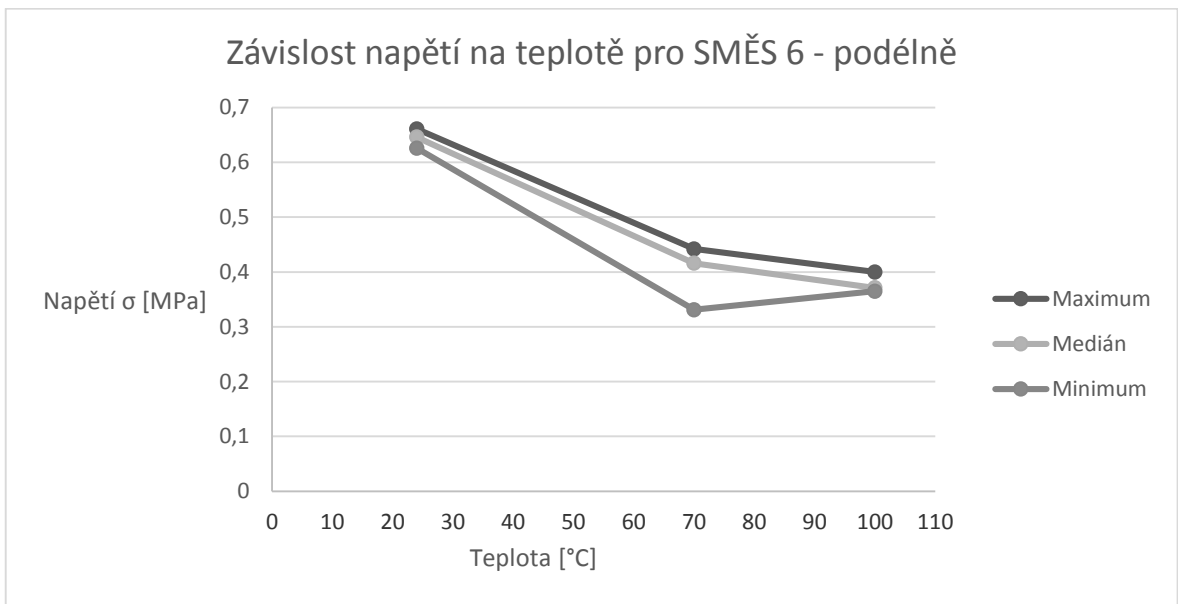
Obrázek 51: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



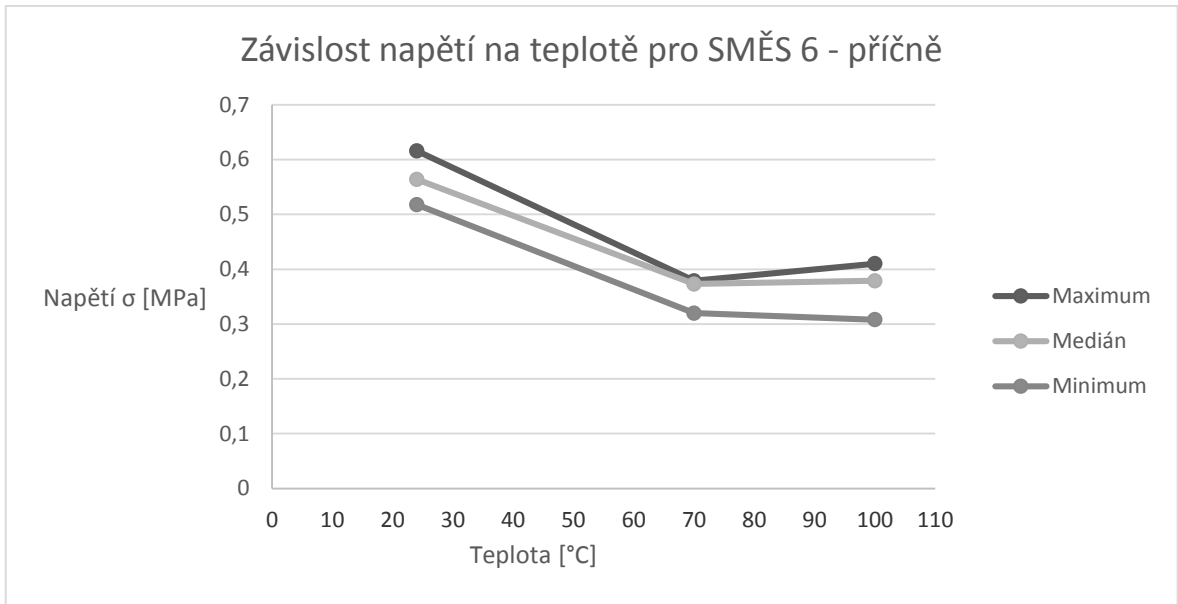
Obrázek 52: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



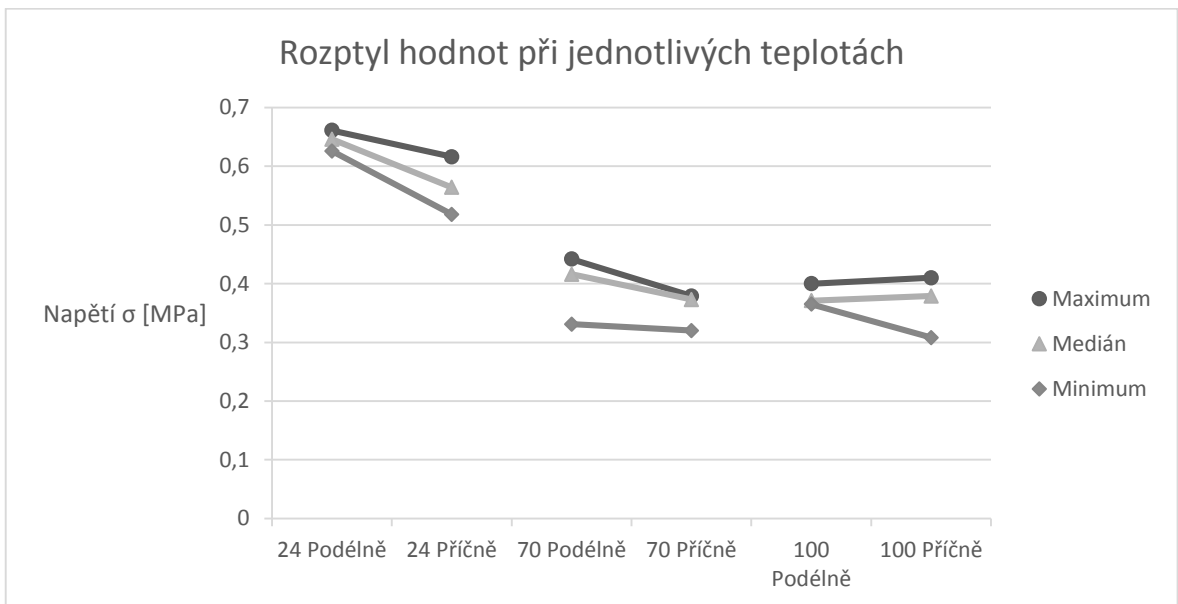
Obrázek 53: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 54: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 55: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 56: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,293	0,275	0,222
S6 Příčně	0,277	0,244	0,210
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,256	0,233	0,214
S6 Příčně	0,251	0,220	0,197
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,239	0,220	0,197
S6 Příčně	0,261	0,214	0,195

Tabulka 27: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 6 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,661	0,646	0,626
S6 Příčně	0,616	0,564	0,518
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,442	0,416	0,331
S6 Příčně	0,379	0,373	0,320
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S6 Podélně	0,400	0,371	0,365
S6 Příčně	0,410	0,379	0,308

Tabulka 28: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 6 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$

5.7 MATERIÁL S7

5.7.1 Čistý smyk

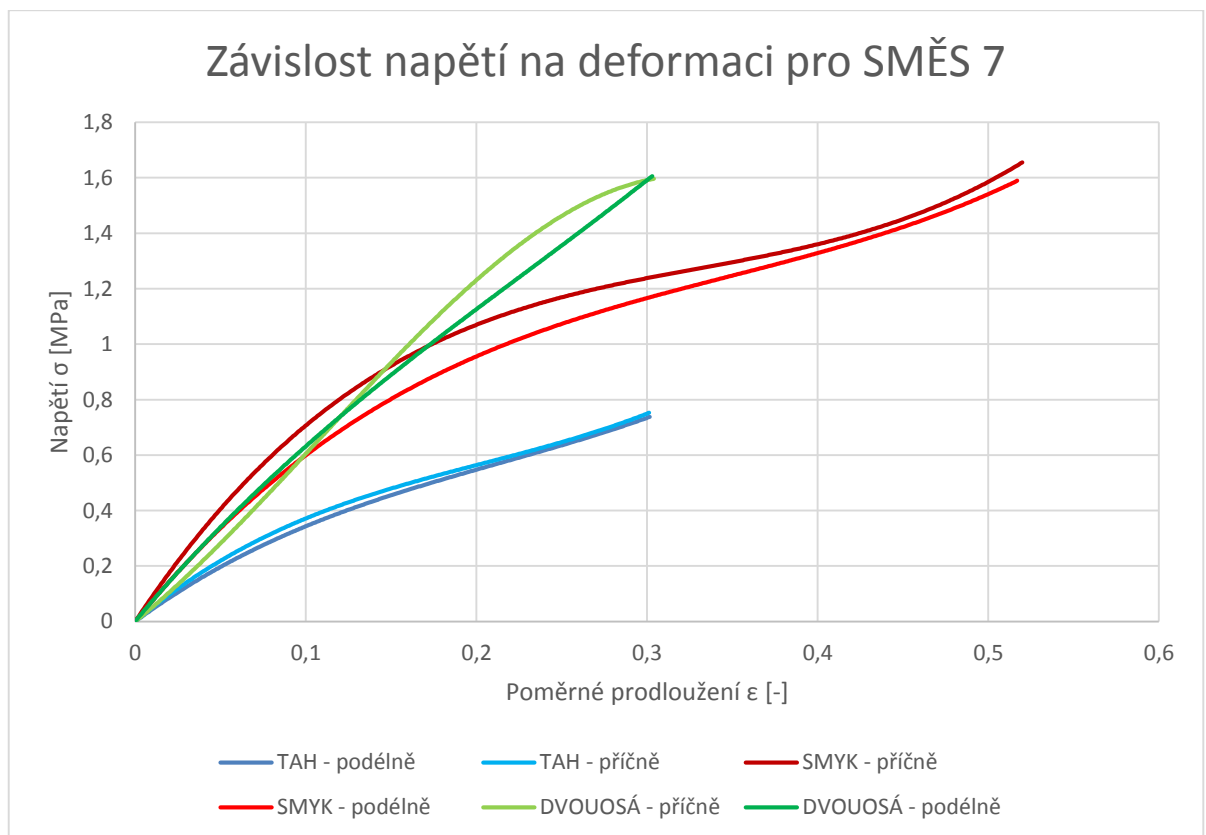
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]				Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 50\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum	Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	1,2554	1,1560	1,1416	S7 Podélně	1,6348	1,5239	1,4808
S7 Příčně	1,2332	1,1953	1,1055	S7 Příčně	1,5499	1,5304	1,4022

Tabulka 29: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 7

5.7.2 Dvouosá napjatost

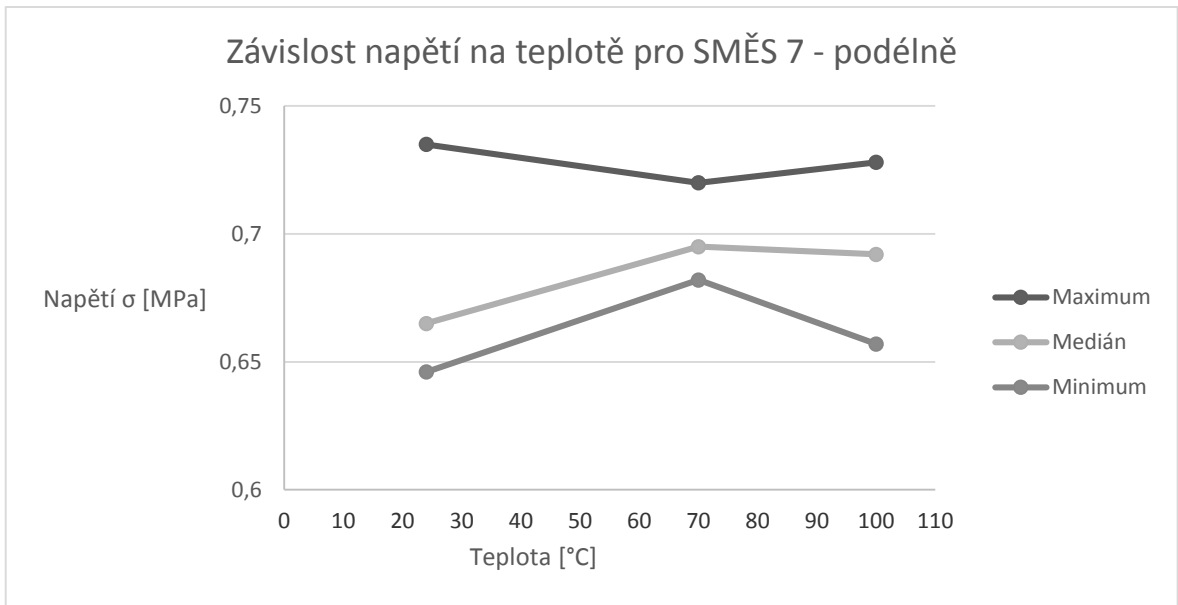
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název směsi	Maximum	Medián	Minimum
S7	1,6844	1,6391	1,5973

Tabulka 30: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 7

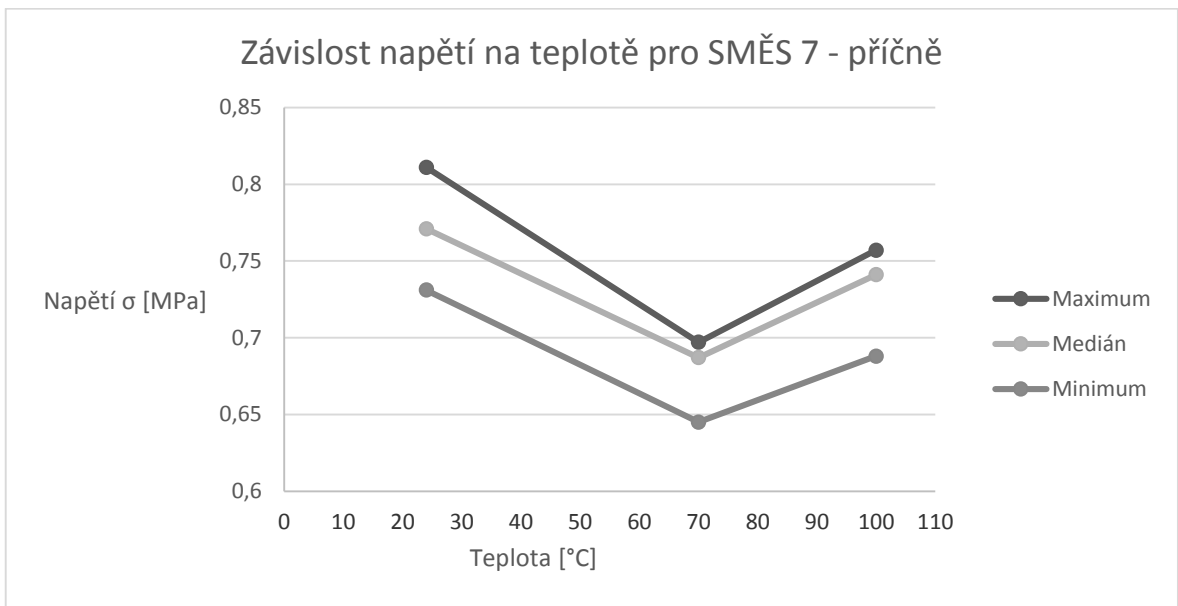


Obrázek 57: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 7

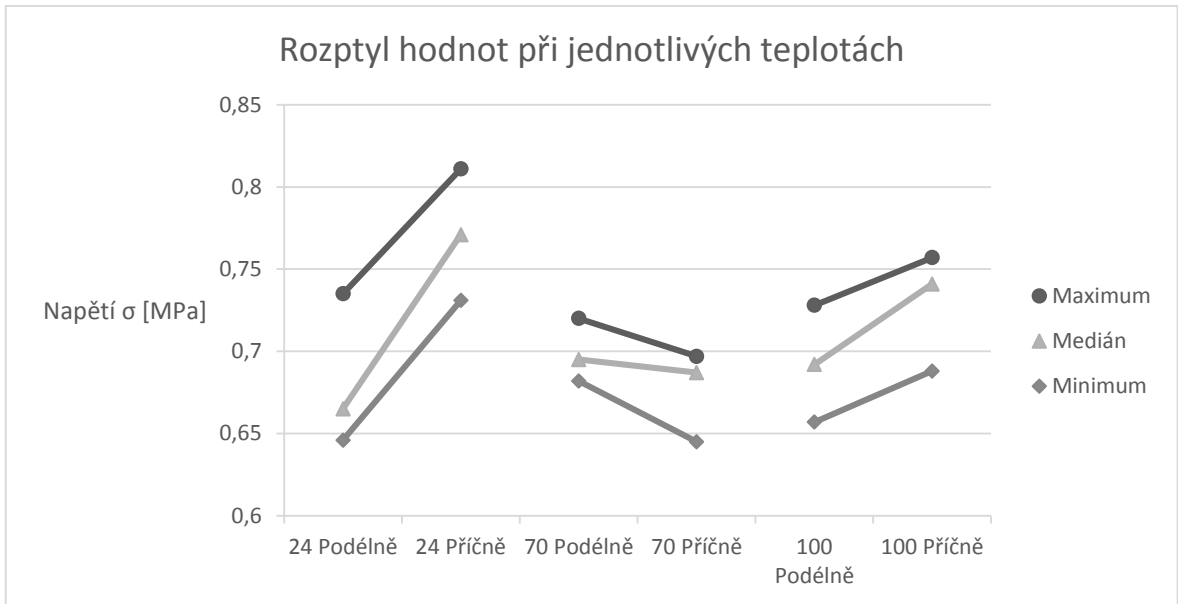
5.7.3 Tah



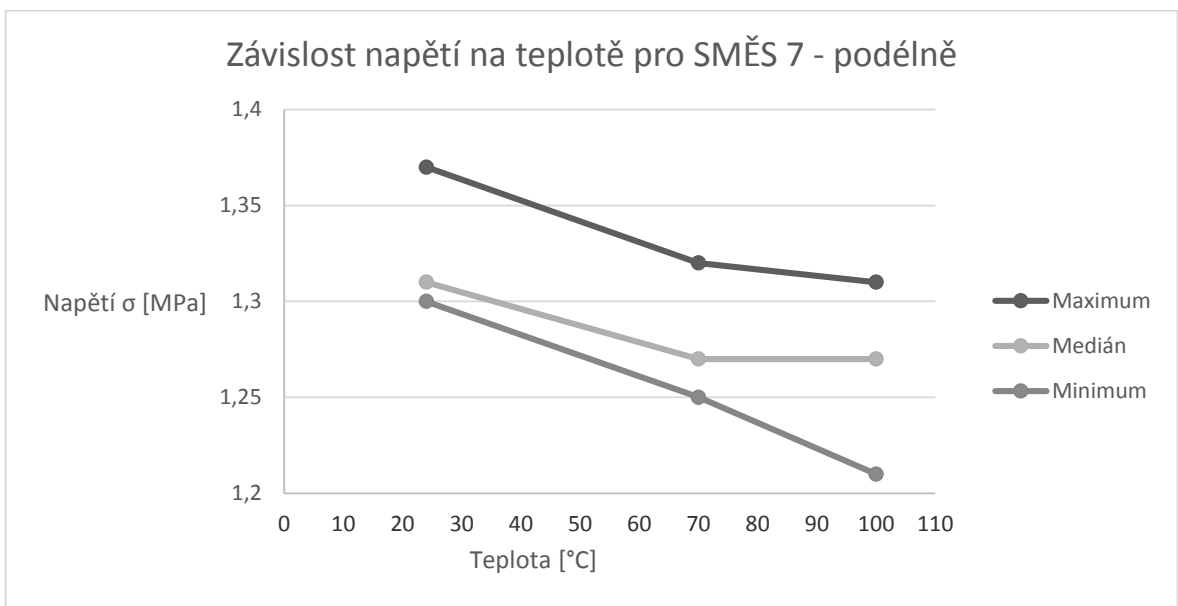
Obrázek 58: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



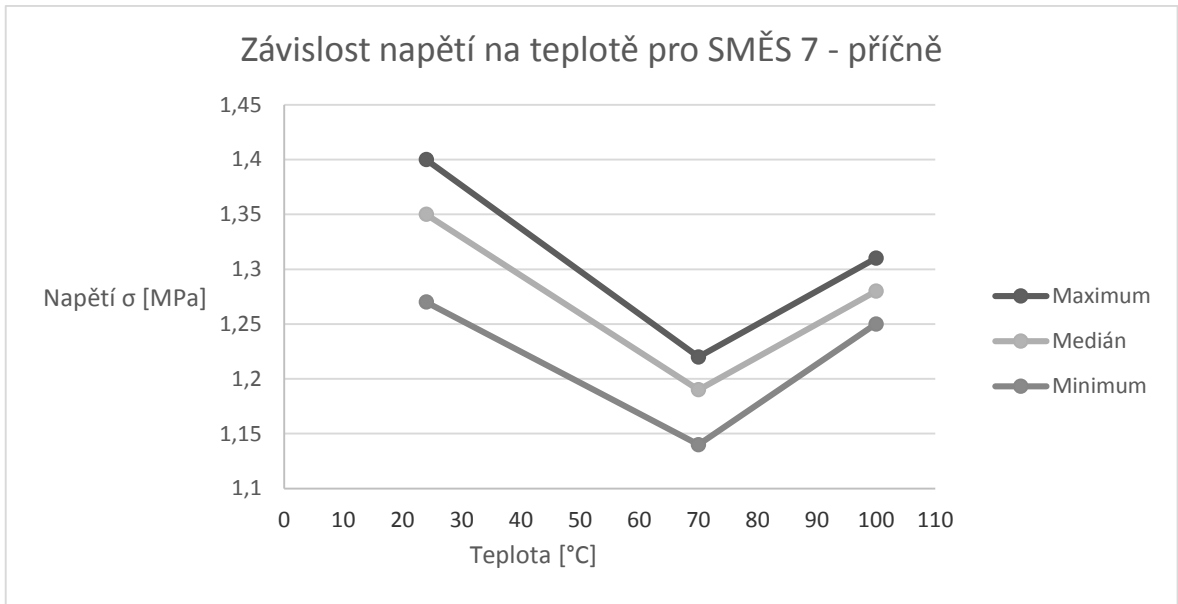
Obrázek 59: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$



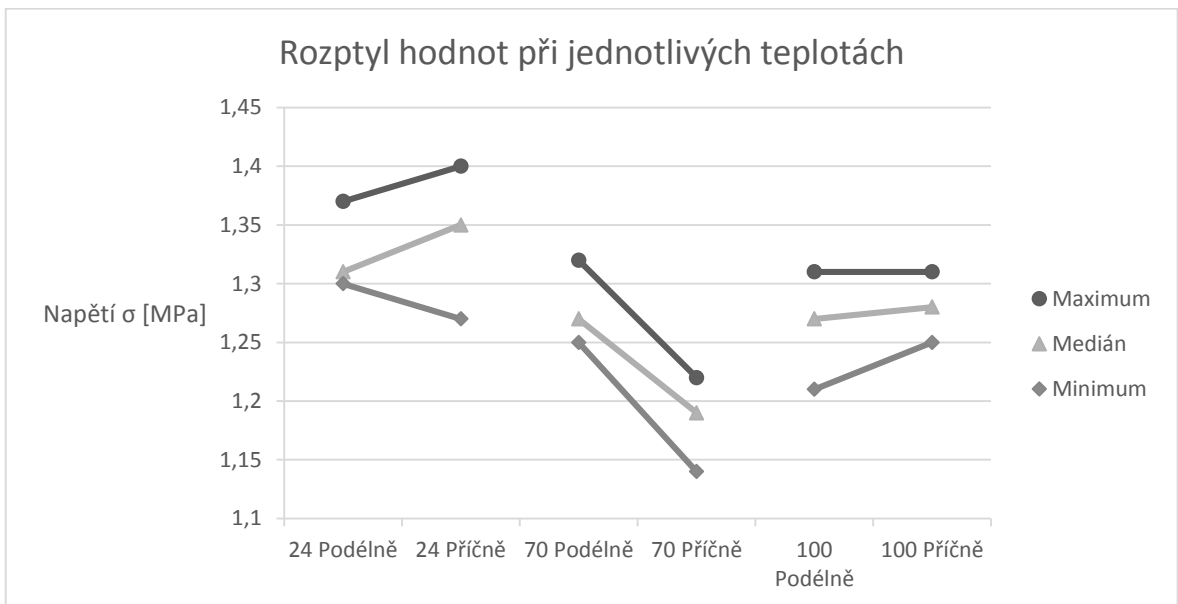
Obrázek 60: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 7 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$



Obrázek 61: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 62: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$



Obrázek 63: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 7 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$

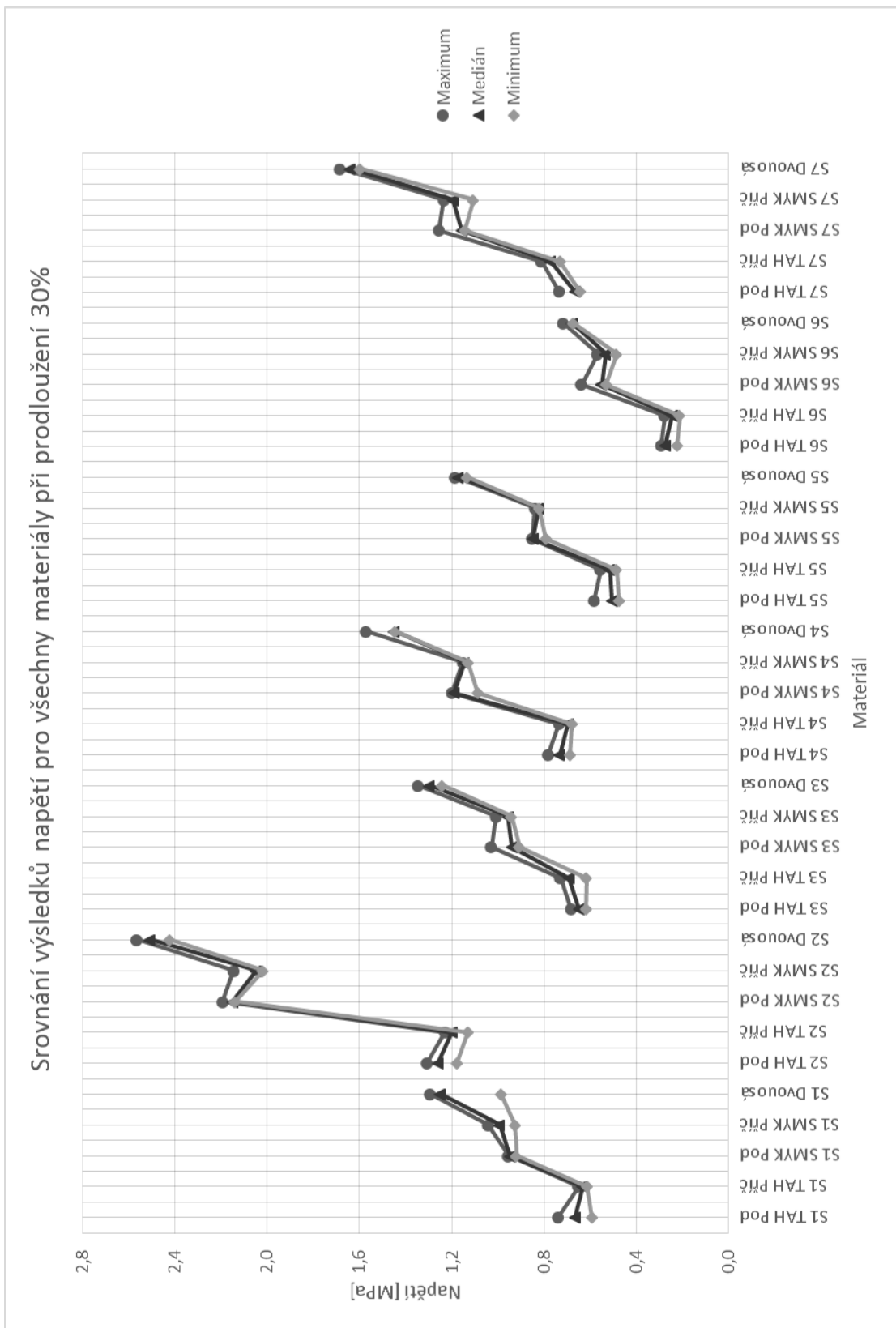
Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	0,735	0,665	0,646
S7 Příčně	0,811	0,771	0,731
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	0,720	0,695	0,682
S7 Příčně	0,697	0,687	0,645
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	0,728	0,692	0,657
S7 Příčně	0,757	0,741	0,688

Tabulka 31: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 7 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$

Napětí při teplotě 24°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	1,370	1,310	1,300
S7 Příčně	1,400	1,350	1,270
Napětí při teplotě 70°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	1,320	1,270	1,250
S7 Příčně	1,220	1,190	1,140
Napětí při teplotě 100°C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
S7 Podélně	1,310	1,270	1,210
S7 Příčně	1,310	1,280	1,250

Tabulka 32: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 7 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$

5.8 Srovnání naměřených hodnot u jednotlivých materiálů



Obrázek 64: Srovnání napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ pro jednotlivé materiály při zkoušce smykové, dvousosé napjatosti a zkoušce jednoosým tahem

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Materiály byly testovány zkouškou tahem, čistým smykem a zkouškou dvouosé napjatosti. Při zkoušce dvouosou napjatostí dosahovaly hodnoty napětí nejvyšších hodnot, u zkoušky tahem pak hodnot nejmenších. Patrné bylo ve výsledných grafech i to, že na hodnoty napětí měl vliv i směr tažení jednotlivých směsí. Vlastnosti směsí udává jejich složení a obsah kaučuku v nich.

Pro směs S1 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 0,95 MPa, v příčném směru 0,99 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 1,25 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 0,66 MPa, v příčném směru 0,63 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,66 MPa, v příčném směru 0,66 MPa. Pro teplotu 100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,63 MPa, v příčném směru 0,67 MPa.

Pro směs S2 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 2,15 MPa, v příčném směru 2,05 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 2,51 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 1,26 MPa, v příčném směru 1,20 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 1,33 MPa, v příčném směru 1,26 MPa. Pro teplotu 100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 1,31 MPa, v příčném směru 1,33 MPa.

Pro směs S3 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 0,94 MPa, v příčném směru 0,96 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 1,30 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 0,65 MPa, v příčném směru 0,69 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,69 MPa, v příčném směru 0,71 MPa. Pro teplotu 100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,68 MPa, v příčném směru 0,69 MPa.

Pro směs S4 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 1,19 MPa, v příčném směru 1,15 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 1,45 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 0,73 MPa, v příčném směru 0,70 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,68 MPa, v příčném směru 0,70 MPa. Pro teplotu

100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,70 MPa, v příčném směru 0,60 MPa.

Pro směs S5 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 0,85 MPa, v příčném směru 0,82 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 1,17 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 0,51 MPa, v příčném směru 0,51 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,52 MPa, v příčném směru 0,50 MPa. Pro teplotu 100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,51 MPa, v příčném směru 0,51 MPa.

Pro směs S6 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 0,55 MPa, v příčném směru 0,53 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 0,68 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 0,28 MPa, v příčném směru 0,24 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,23 MPa, v příčném směru 0,22 MPa. Pro teplotu 100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,22 MPa, v příčném směru 0,21 MPa.

Pro směs S7 byla naměřena hodnota mediánu pro modul 30 % v čistém smyku a podélném směru tažení 1,16 MPa, v příčném směru 1,20 MPa. Ve dvouosém tahu byla hodnota mediánu 1,64 MPa. V jednoosém tahu pro teplotu 24°C byla hodnota mediánu v podélném směru 0,67 MPa, v příčném směru 0,77 MPa. Pro teplotu 70°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,70 MPa, v příčném směru 0,69 MPa. Pro teplotu 100°C byla naměřena hodnota mediánu v podélném směru 0,69 MPa, v příčném směru 0,74 MPa.

Nejvyšší tuhost vykazovala směs S2, nejmenší směs S6.

Materiály S1, S5 měly v podélném i příčném směru téměř totožné hodnoty napětí. Směsi S3 a S7 měly vyšší hodnoty napětí pro směr příčného tažení. Směs S4 pak měla vyšší napětí pro směr podélného tažení.

Při jednoosém tahu se zvyšující teplotou rostlo napětí u směsi S2, u ostatních pak spíše klesalo.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo stanovit mechanické vlastnosti pro 7 různých směsí. Pro každou směs pak probíhala zkouška čistým smykem, dvouosým tahem a jednoosým tahem za různých teplot.

Měření probíhalo v univerzitních laboratořích. Při zkoušce čistým smykem bylo zkušební tělísko tvaru obdélníku protahováno pro zjištění napětí při poměrném protažení 30 % a 50 %. U dvouosého tahu bylo zkušební tělísko kruhového tvaru nafukováno a zjišťováno bylo napětí při poměrném protažení 30 %. Při jednoosém natahování bylo tělísko cyklicky namáháno nejprve na poměrné protažení 60 %, posléze 5x do protažení 30 % původní délky. Měření u jednoosého tahu probíhalo při teplotách 24°C, 70°C, 100°C. Měření u čistého smyku a dvouosé napjatosti probíhalo při teplotě 24°C.

Výsledky pak byly zpracovány do tabulek a grafů závislosti napětí na poměrném protažení u každé ze směsí. Získané hodnoty jsou pak důležité pro další zpracování a výroby z těchto gumárenských směsí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 9788070806623.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. Gumárenské suroviny a jejich zpracování. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009, 199 s. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [3] Prekop, Š. a kolektiv. Gumárenská technológia I, Žilina: Vydavateľství UNIZA, 1998, 282s. ISBN 80-7100-483-9.
- [4] Ducháček, V. Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery, Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2006, 158s. ISBN 80-02-01784-6.
- [5] Komárek, Z. Přehled výroby pryže, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1973, 328 s.
- [6] Franta, I. a kolektiv. Gumárenská technologie I, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1979, 608 s.
- [7] DUCHÁČEK, Vratislav. Změkčovadla. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2010, 207 s. ISBN 978-80-02-02287-9.
- [8] Maláč, J. Gumárenská technologie [online], [cit. 29.10.2015]. Dostupný z WWW: <www.utb.cz/file/36216_1_1/>
- [9] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. Elastomerní konstrukční materiály. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2009, 93 s. ISBN 978-80-02-02155-1.

- [10] Burdík, M. Výpočtové modelování tlumiče rázů z plastických a hyperelastických materiálů. Brno 25.9.2009 [cit. 12.11.2015]. Dostupný z WWW: <www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17360>. Diplomová práce. VUT v Brně. Burša, J.
- [11] DORFMANN, Al. Constitutive Models for Rubber. Rotterdam: Brookfield, 1999, 316 s. ISBN 90-5809-113-9.
- [12] POPA, Gabriel A. Rubber: types, properties, and uses. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, c2011, xvii, 689 p. ISBN 9781617614644.
- [13] Kubík, J. Zkušební metody v gumárenství, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1962, 297s.
- [14] Jan Steklý, Ondřej Marada, Marek Linhart . CAD.cz. . [online]. 19.11.2015 [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/5719-snizovani-nakladu-na-vyvoj-vyrobku-s-vyuzitim-mkp-software-simulia-abaqus.html>
- [15] Teach Me Something. [online]. 19.11.2015 [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://www.city-data.com/forum/other-topics/2358156-teach-me-something.html>
- [16] Javořík, J. Zkoušení rovnoměrné rovinné napjatosti elastomerů, UTB ve Zlíně, 2005, [učební text].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T_g [°C]	Teplota skelného přechodu
H_m [%]	Hmotnostní procenta
D_{sk} [-]	Díly na sto dílů kaučuku
W [J]	Měrná deformační energie
I_i [-]	Invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace
λ_i [-]	Hlavní protažení
l_i [mm]	Deformovaná délka
l_0 [mm]	Původní délka
S_{ij} [Pa]	Složky 2.Piola- Kirchhoffova tenzoru napětí
t [Pa]	Cauchyho napětí
c_{ij} []	Složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru
σ_i [Pa]	Napětí
P [Pa]	Neznámé stlačení
d [-]	Parametr nestlačitelnosti
J [-]	Třetí invariant tenzoru deformačního gradientu
C_{ij} [Pa]	Materiálové konstanty
α_i [Pa]	Materiálové parametry
μ_i [Pa]	Materiálové parametry
G [Pa]	Modul pružnosti ve smyku
F [N]	Síla
S [m ²]	Průřez
ε [-]	Poměrné prodloužení
ε_p [%]	Tažnost
r [m]	Poloměr tělíska

NR [-] Přírodní kaučuk (Přírodní polyisopren)

BR [-] Polybutadienový kaučuk

SBR [-] Butadienstyrenový kaučuk

CIIR [-] Chlorbutylový kaučuk

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Cis- konfigurace přírodního kaučuku.....	13
Obrázek 2: Trans- konfigurace gutaperče.....	13
Obrázek 3: Polymerace SBR	15
Obrázek 4: Strukturní vzorec polyizoprenu.....	15
Obrázek 5: Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [14].....	22
Obrázek 6: Jednoosá napjatost.....	24
Obrázek 7: Dvouosá napjatost	25
Obrázek 8: Čistý smyk.....	26
Obrázek 9: Dvouosá napjatost pomocí membránového nafouknutí [16]	30
Obrázek 10: Schéma měření dvouosé napjatosti natahováním čtverce	31
Obrázek 11: Zkouška smykem	32
Obrázek 12: Schéma vystřiženého zkušebního tělíska pro čistý smyk	36
Obrázek 13: Schéma zkušebního tělíska pro zkoušku tahem	38
Obrázek 14: Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti.....	40
Obrázek 15: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 1	41
Obrázek 16: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	42
Obrázek 17: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	42
Obrázek 18: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	43
Obrázek 19: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	43
Obrázek 20: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 1 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	44
Obrázek 21: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	44
Obrázek 22: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 2.....	46
Obrázek 23: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	47

Obrázek 24: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	47
Obrázek 25: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	48
Obrázek 26: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	48
Obrázek 27: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 2 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	49
Obrázek 28: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	49
Obrázek 29: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 3	51
Obrázek 30: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	52
Obrázek 31: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	52
Obrázek 32: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	53
Obrázek 33: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	53
Obrázek 34: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 3 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	54
Obrázek 35: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	54
Obrázek 36: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 4	56
Obrázek 37: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	57
Obrázek 38: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	57
Obrázek 39: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	58

Obrázek 40: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	58
Obrázek 41: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 4 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	59
Obrázek 42: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	59
Obrázek 43: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 5	61
Obrázek 44: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	62
Obrázek 45: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	62
Obrázek 46: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	63
Obrázek 47: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	63
Obrázek 48: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 5 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	64
Obrázek 49: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	64
Obrázek 50: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 6	66
Obrázek 51: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	67
Obrázek 52: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	67
Obrázek 53: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	68
Obrázek 54: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	68
Obrázek 55: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 6 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	69

Obrázek 56: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	69
Obrázek 57: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro SMĚS 7	71
Obrázek 58: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	72
Obrázek 59: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	72
Obrázek 60: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 7 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	73
Obrázek 61: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v podélném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	73
Obrázek 62: Závislost napětí na teplotě v tahu pro Směs 7 v příčném směru při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	74
Obrázek 63: Rozptyl hodnot napětí ve Směsi 7 pro měřené teploty při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	74
Obrázek 64: Srovnání napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ pro jednotlivé materiály při zkoušce smykové, dvouosé napjatosti a zkoušce jednoosým tahem	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení jednotlivých směsí	34
Tabulka 2: Informace o zkušebním zařízení SHIMADZU	36
Tabulka 3: Tabulka rozměrů vysekávacích nožů dle normy ČSN ISO 37	37
Tabulka 4: Informace o zkušebním zařízení ZWICK 1456	38
Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 1	41
Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 1	41
Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 1 při poměrném prodloužení ϵ = 30 %	45
Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 1 při poměrném prodloužení ϵ = 60 %	45
Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 2	46
Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 2	46
Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 2 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	50
Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 2 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	50
Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 3	51
Tabulka 14: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 3	51
Tabulka 15: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 3 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	55
Tabulka 16: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 3 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	55
Tabulka 17: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 4	56
Tabulka 18: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 4	56
Tabulka 19: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 4 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	60
Tabulka 20: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 4 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	60
Tabulka 21: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 5	61
Tabulka 22: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 5	61

Tabulka 23: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 5 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	65
Tabulka 24: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 5 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	65
Tabulka 25: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 6	66
Tabulka 26: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 6	66
Tabulka 27: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 6 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	70
Tabulka 28: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 6 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	70
Tabulka 29: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro Směs 7	71
Tabulka 30: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro Směs 7	71
Tabulka 31: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 7 při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$	75
Tabulka 32: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro Směs 7 při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$	75