

Charakteristika vlastností elastomerů se zahrnutím vlivu času

Bc. Jiří Kolařík

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jiří Kolařík
Osobní číslo:	T21405
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Charakteristika vlastností elastomerů se zahrnutím vlivu času

Zásady pro vypracování

- Literární přehled
- Příprava experimentu
- Experiment
- Vyhodnocení výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

- SMITH, L. P. *The language of rubber: an introduction to the specification and testing of elastomers*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993, x, 255 s. ISBN 0-7506-1413-7.
- SUTTON, M.A., ORTEU, J.J., SCHREIER, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US, 2009, 321 s. ISBN 978-0-387-78746-6.
- EIRICH, F. R., ERMAN, B., MARK, J.D. *Science and technology of rubber*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. 743 s. ISBN 0124647863.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Jiří Kolařík

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Creep, (tečení materiálu), je jev, při kterém postupně dochází k deformaci materiálu, když na materiál po delší dobu nepřetržitě působí konstantní zatížení. Jde o důležitou vlastnost při volbě vhodného materiálu do konkrétních aplikací. Předmětem této diplomové práce je především zkoumání této vlastnosti u pěti různých elastomerních materiálů. V teoretické části je popsána moderní bezkontaktní optická metoda DIC k měření deformací, stav deformace a napjatosti, vlastnosti kaučuků a elastomerních materiálů a prováděné mechanické zkoušky.

V praktické části je popsán postup zkoušení tečení materiálu během jednoosého a dvouosého zatížení pro všechny dané jednotlivé elastomerní materiály a výsledky těchto zkoušek zaznamenány za pomoci tabulek a grafů.

Klíčová slova: creep, tečení, elastomer, DIC, hyperelastická, napjatost, deformace, pryž

ABSTRACT

Creep, is a phenomenon in which a material gradually deforms when a constant load is continuously applied to the material over a long period of time. This is an important characteristic when selecting the right material for specific applications. The main subject of this master thesis is the investigation of this property in five different elastomeric materials. The theoretical part describes the modern non-contact optical DIC method for strain measurement, the state of deformation and stress, the properties of rubbers and elastomeric materials and the mechanical tests.

The creep testing of the material during uniaxial and biaxial loading for all given individual elastomeric materials is described in the practical part and the results of these tests are presented using tables and graphs.

Keywords: creep, elastomer, DIC, hyperelasticity, tension, deformation, rubber

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Jakubu Javoříkovi Ph.D. za jeho příjemný přístup při vedení práce, trpělivost, cenné rady a zejména za čas věnovaný mé diplomové práci.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 METODA DIGITÁLNÍ KORELACE OBRAZU (DIC)	11
1.1 PRINCIP METODY	12
1.2 PRINCIP A TYPY DIC SYSTÉMŮ	14
1.2.1 Standardní 3D DIC (stereo DIC).....	14
1.2.2 Mikro DIC	17
1.2.3 Vysokorychlostní DIC	18
2 DEFORMACE A NAPJATOST	19
2.1 DEFORMACE.....	20
2.1.1 Jednoosý deformační stav	20
2.1.2 Dvouosý deformační stav.....	21
2.1.3 Tříosý deformační stav.....	21
2.1.4 Elastická deformace	22
2.1.5 Plastická deformace	22
2.2 NAPJATOST.....	22
2.2.1 Prostorová napjatost	23
2.2.2 Rovinná napjatost.....	24
3 ELASTOMERY A JEJICH VLASTNOSTI	26
3.1 KAUČUK.....	27
3.1.1 Přírodní kaučuk	27
3.1.2 Syntetický kaučuk	28
3.2 VLASTNOSTI ELASTOMERNÍCH MATERIÁLŮ	29
3.2.1 Hyperelastické chování	30
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY ELASTOMERŮ	34
4.1 ZKOUŠKA JEDNOOSÉ NAPJATOSTI.....	35
4.2 ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI.....	36
4.3 ZKOUŠKA TEČENÍ MATERIÁLU (CREEP TEST).....	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
5 CÍL PRÁCE	39
5.1 ZKOUŠENÉ MATERIÁLY	39
5.2 ZKOUŠKA TEČENÍ MATERIÁLU (CREEP TEST) – JEDNOOSÉ ZATÍŽENÍ.....	39
5.2.1 Výroba zkušebních tělísek	40
5.2.2 Popis zkušebního zařízení	42
5.2.3 Pracovní postup	44
5.2.4 Vyhodnocení výsledků	45
5.3 ZKOUŠKA TEČENÍ MATERIÁLU (CREEP TEST) – DVOUOSÉ ZATÍŽENÍ.....	46

5.3.1	Výroba zkušebních tělísek	47
5.3.2	Popis zkušebního zařízení	48
5.3.3	Pracovní postup	49
5.3.4	Vyhodnocení výsledků	53
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	54
6.1	MATERIÁL 1	54
6.1.1	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení	54
6.1.2	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení	55
6.2	MATERIÁL 2	56
6.2.1	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení	56
6.2.2	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení	57
6.3	MATERIÁL 3	58
6.3.1	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení	58
6.3.2	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení	59
6.4	MATERIÁL 4	60
6.4.1	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení	60
6.4.2	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení	61
6.5	MATERIÁL 5	62
6.5.1	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení	62
6.5.2	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení	63
6.6	SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ ZKOUŠEK U VŠECH TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ	64
6.6.1	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení	64
6.6.2	Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení	66
6.6.3	Porovnání naměřených hodnot dodatečného poměrného prodloužení u všech materiálů	68
7	DISKUSE VÝSLEDKŮ	70
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK	82

ÚVOD

Elastomerní materiály se používají jako konstrukční materiál skoro ve všech nejrůznějších výrobních oborech, největší objem je pak spotřebován zejména při výrobě pneumatik. Jedná se o polymerní materiál, který se vyznačuje elastickým chováním, za působení i malé síly lze dosáhnout velkých deformací. Tyto deformace jsou ve většině případů při malých zatíženích vratné. Při větších zatíženích mohou protažení u elastomerů dosahovat až několik set procent vůči původnímu rozměru, aniž by došlo k porušení materiálu. Vyskytuje se u nich nelineární průběh závislosti napětí na deformaci a jsou téměř objemově nestlačitelné. Základní složkou směsi jsou kaučuky, které ve spojení s dalšími přísadami, jako plnivy, změkčovadly a vulkanizačním systémem tvoří gumárenskou směs.

Charakteristika tečení materiálu (creep) popisuje chování materiálu během stavu, kdy působí na materiál v delším čase konstantní zatížení a dochází k jeho postupné deformaci. Během této situace se zvyšuje odpor vůči deformaci, až se v určitém bodě zastaví. Tečení souvisí také se silou, která na těleso působí, při větší síle dojde k většímu tečení. Zkoušky tečení se provádějí při konstantních podmínkách prostředí a teploty. Na základě zjištěných výsledků lze posoudit vhodnost daných materiálů pro konkrétní aplikace.

K měření deformací během těchto zkoušek lze použít moderní metodu digitální obrazové korelace (DIC). Jedná se o bezkontaktní optickou metodu, která je velice citlivá k měření jednotlivých posunutí během zkoušky, za pomoci pořízených snímků z měření porovnává umístění jednotlivých bodů na zkušebním tělísku v průběhu celého měření a s použitím výpočtů stanovuje deformaci. Metoda se dá rozdělit na tři základní skupiny typů měření, 2D DIC, kde stačí použití jedné kamery, stereo DIC, kde už je zapotřebí alespoň dvou kamer a 3D DVC. Vzhledem ke stále modernější technice v oblasti kamerových systémů, jsme schopni dosahovat čím dál přesnějších výsledků, tudíž tato metoda nachází pořád větší uplatnění.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 METODA DIGITÁLNÍ KORELACE OBRAZU (DIC)

Metodu DIC, tedy měření pomocí digitální obrazové korelace, můžeme zařadit mezi jednu z nejmodernějších metod s velmi komplexním uplatněním. DIC je optická metoda, jež slouží k měření posunutí a prostorových poměrných deformací. Jedná se tedy o bezkontaktní metodu, která za pomoci techniky digitální korelace obrazu zkoumá průběh deformací. Vyznačuje se velkou citlivostí na jednotlivá posunutí v průběhu měření a značnými možnostmi uplatnění. [1]

Metodu digitální obrazové korelace lze rozdělit na tři základní skupiny měření, podle způsobu a průběhu měření. Jedná se o skupiny 2D DIC, stereo DIC a 3D DVC. Princip metody DIC v nynější podobě mohl být poprvé k vidění na konci 20. století, a to konkrétně v 80. letech v Jižní Karolíně. Nicméně metoda se začala výrazně využívat až během posledních let, kdy došlo k velkému pokroku v rámci výpočetní techniky a také ke značné modernizaci v odvětví pořizování digitálních fotografií. [1,2]

Sama metoda nám umožňuje sledování různých jevů během průběhu deformace, či pohybu objektu jakéhokoliv rozměru a tvaru. Metodu lze uplatnit na velké množství různých materiálů. Korelační systémy používané v této metodě jsou schopny sledovat rozsáhlý okruh bodů na daném povrchu, tato skutečnost nám dovoluje provést vizualizaci měřené veličiny po celé oblasti, která je sledována. Systémy DIC mají v porovnání s konvenčními metodami hned několik výhod:

- Měření je uskutečněno bez jakéhokoliv kontaktu s měřeným tělesem
- Lze aplikovat i v místech, kde je to běžnými konvenčními metodami velmi obtížné, ne-li dokonce nemožné
- Možnost měřit v libovolném místě oblasti, kterou sledujeme
- Schopnost systému zachytit nehomogenní pole v celé oblasti, kterou sledujeme [1]

1.1 Princip metody

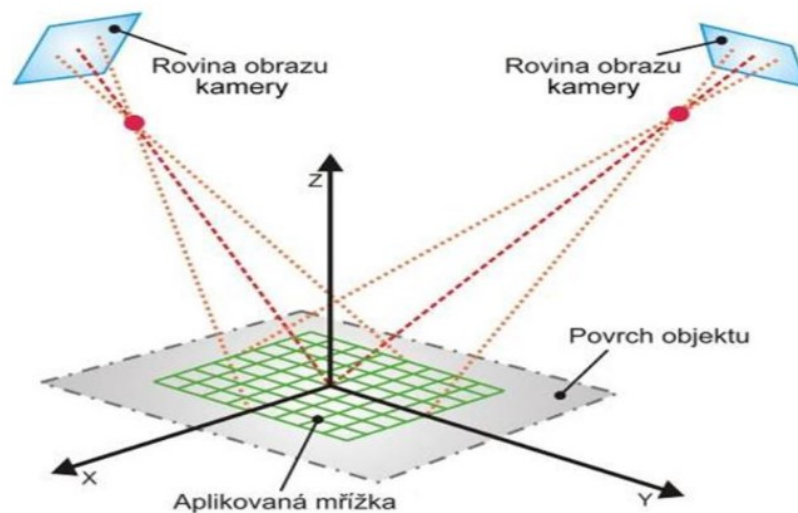
Podstatou této metody je sledování náhodně vytvořeného kontrastního vzoru (většinou se jedná o černobílý vzor, ale může být i jiné barvy, jako například inkoust) na povrchu materiálu tělesa, které je mechanicky zkoušeno nebo jinak zkoumáno. Ve většině případů mluvíme o nanášení bílé barvy na černý podklad nebo černé barvy na bílý podklad. Toho se docílí běžně za pomoci popisovačů, fixů nebo spreje. Oblast, kterou pozorujeme, se pak může rozdělit virtuální mřížkou na tzv. fazety. Fazeta je menší část oblasti, která po nanášení vzoru obsahuje charakteristickou část vzoru s potřebným kontrastem. [1,4]

Na základě korelace stejných fazet před započítí deformace a po deformaci jsme schopni určit posunutí a poměrné deformace jednotlivých bodů v oblasti. U rovinné obrazové korelace jsou deformace tělesa určené na základě pozorování jednou kamerou, která je namířena kolmo na povrch daného tělesa. Tento typ metody nazýváme 2D DIC a dovoluje nám určit deformaci tělesa, které je v rovině rovnoběžné s obrazovou rovinou kamery, jež sleduje průběh deformace. Pro tyto účely je tedy možné využít snímání obrazu jen jednou kamerou, nicméně je nutné, aby povrch měřeného tělesa byl pravidelný a rovinný. Snímání jednou kamerou však nelze využít, jestliže deformační pohyb probíhá současně i v jiné rovině, než je rovina snímání. Za této situace by se muselo využít kamer dvou, i přes to, že by bylo měřeno rovinné těleso. [1,2,5]

U měření prostorového je proces podobný, jako u rovinné obrazové korelace popsané výše. Prostorovou metodu nazýváme stereo DIC a k měření je zapotřebí alespoň dvou kamer. Stereo snímání je zde využito k prostorové analýze a měření deformací nepravidelného povrchu a pohyb zde probíhá ve více rovinách (např. stlačování, ohyb, nárazy). Využívá se zde stereoskopického nebo trioskopického uspořádání snímačů. Většinou však jde o stereoskopické uspořádání, trioskopické se používá jen v rámci speciálních případů. Jestliže je těleso pozorované kamerami, které jsou umístěny ve dvou různých směrech, pozice každého bodu daného povrchu je zaostřena na určitý pixel v obrazové rovině náležité kamery. [1,3,6,7]

Při experimentálním nastavení je velice důležité správné rozmístění kamer. Rozmístění se volí na základě stereo-úhlu a základní linie. Stereo-úhel je úhel, který svírají osy obou kamer a základní linie je prakticky vzdálenost mezi kamerami. Úhel je volen vždy individuálně, podle dané aplikace a tvaru měřeného tělesa. Doporučená je volba spíše užšího úhlu, v praxi cca do 40° mezi kamerami. Jestliže jsou pro nás známé polohy obou

kamer vzájemně vůči sobě, zvětšení objektivů a všechny parametry generovaného obrazu (říkáme jim kalibrační parametry), systém je schopen vypočítat absolutní trojrozměrné souřadnice každého bodu daného povrchu a vytvořit jeho virtuální prostorový obrys. Digitalizované snímky, které jsou zachyceny v jednotlivých krocích měření, v čase, kdy se body na povrchu přemísťují vlivem působícího zatížení, jsou v procesu korelace porovnávány s vybraným referenčním krokem. Jako výsledek tohoto porovnání dostaneme deformační pole a pole posunutí povrchových bodů během jednotlivých časových okamžiků. [1,3,6,7]



Obr. 1: Princip stereo DIC korelace s použitím dvou kamer

Posledním nezmíněným typem metody digitální obrazové korelace je 3D DVC (písmeno V zde znamená volume, tzn. objem). Tento typ nám umožňuje měřit deformace a posun i uvnitř měřeného tělesa. Tato metoda nachází uplatnění u rentgenové výpočetní tomografie, konfokální mikroskopii nebo magnetické rezonanci. [2]

Jakmile máme zvolenou metodu a rozmístěny kamery, je nejprve nutné provést kalibraci za pomoci kalibrační mřížky, která má na sobě umístěny obrazové body. Pokud kalibrujeme zařízení pro rovinnou obrazovou korelaci, pak je kalibrační mřížka umístována rovnoběžně s rovinou tělesa, které je měřeno a kamery. Je provedeno několik snímání mřížky, která je během snímání různě posouvána v rovině. Software vyhodnotí na základě pořízených snímků a vybere nejvhodnější umístění souřadného systému. V případě stereo DIC se také provádí kalibrace za pomoci kalibrační mřížky, tu je zde ale nutné kromě posouvání také natáčet v prostoru. Touto kalibrací získáme společný souřadný

system pro obě kamery. Kromě kalibrace je také výhodné zvolit definovanou oblast zájmu, to se provede oříznutím a přiblížením záběru. Daná oblast se nazývá AOI (area of interest) a je na ní provedeno měření a analýza softwarem. [2]

1.2 Princip a typy DIC systémů

DIC systémy obsahují počítač s potřebným softwarem, kamery s vysokým rozlišením a soustavu světelné techniky, která nám zajistí dobrou viditelnost a kontrast získávaného obrazu. Konkrétní uspořádání a rozmístění komponentů se liší podle typu měření a zkoumaného tělesa. [2,4]

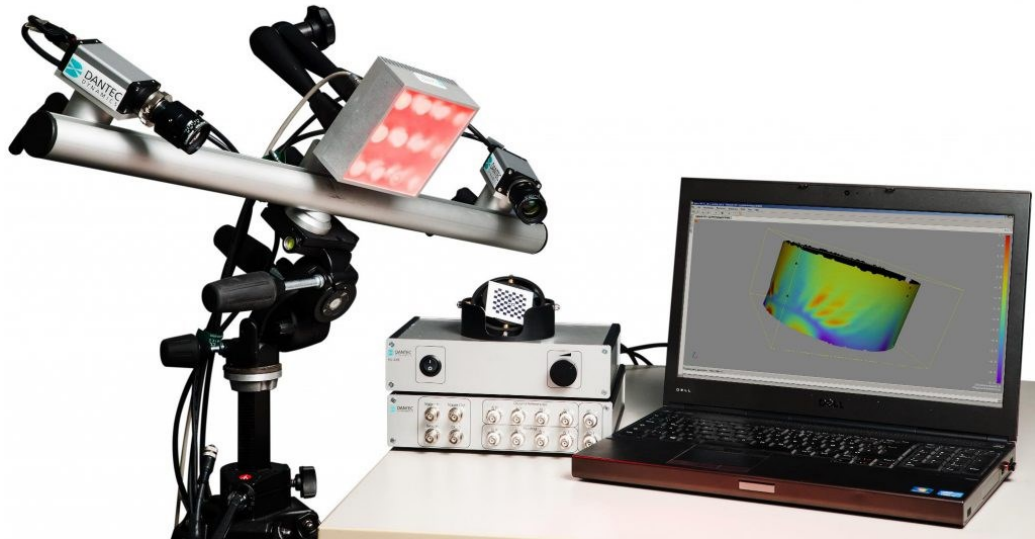


Obr. 2: Struktura DIC systému – soustava kamer a světel [32]

Konkrétní příklady moderních DIC systémů

1.2.1 Standardní 3D DIC (stereo DIC)

Standardní digitální 3D obrazový korelační systém je optické měřicí zařízení určené pro bezkontaktní trojrozměrné měření tvaru, posunů a deformací na součástech a konstrukcích z téměř jakéhokoli materiálu v celém svém poli. Používá se ke stanovení trojrozměrných vlastností materiálu při zkouškách v tahu, krutu, ohybu nebo kombinovaných zkouškách. Kromě klasických zkoušek lze deformační analýzu použít také při únavových zkouškách, lomové mechanice, validaci metodou konečných prvků a v mnoha dalších případech. Tento systém umožňuje širokou škálu aplikací od mikroskopického zkoumání mikroelektronických nebo biomedicínských materiálů až po rozsáhlá měření leteckých, automobilových, či námořních a železničních komponentů. [8]



Obr. 3: systém DIC Standard 3D – Q400 od firmy Dantec Dynamics [8]

Široká možnost aplikací:

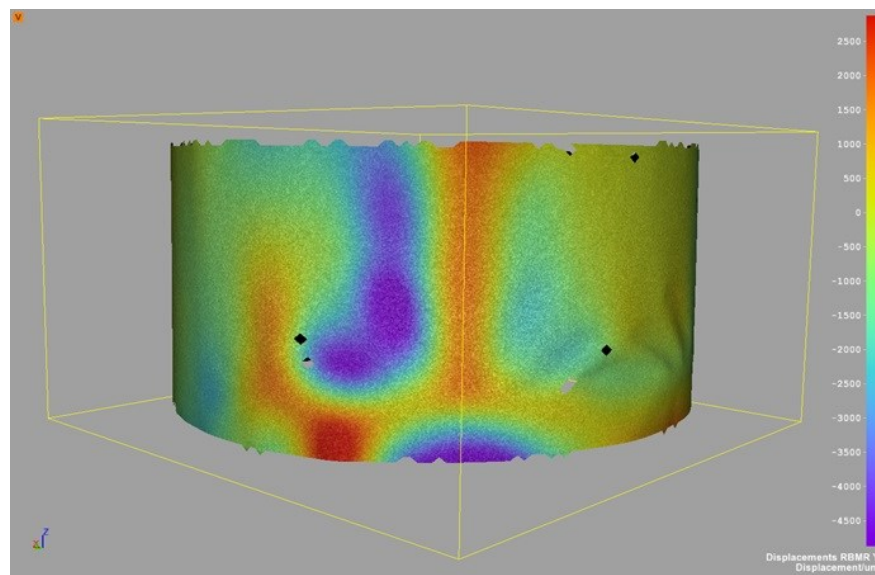
- Pro různé materiály (CFRP, dřevo, PE, kovová pěna, pryž...)
- Testování součástí (tvar, posuny, deformace...)
- Ověřování lomové mechaniky metodou konečných prvků
- Zkoušení materiálů (Youngův modul, Poissonův poměr, elastoplastické chování)
- Vysokorychlostní aplikace (dynamická měření, přechodné děje). [8]

Standardní 3D DIC vyhodnocuje data v reálném čase a umožňuje nám exportovat data současně jako analogový napěťový signál. Všechny parametry měření lze uložit a znovu použít pro opakované nebo podobné série měření. Indikátor kvality skvrn dále podporuje vyhodnocení správného vzoru a optického nastavení na začátku měření. Předdefinované parametry nám pomáhají při rozhodování o správném nastavení DIC. Všechny parametry systému se určují rychlým a snadným kalibračním postupem. Proces zahrnuje umístění kalibrační mřížky před kamery. Dosažená přesnost kalibrace se po kalibraci zobrazuje online. [8]



Obr. 4: příslušenství s kalibrační mřížkou [8]

Snadné rozšíření tohoto systému z dvoukamerového na tříkamerový systém zvětšuje pole měření, zlepšuje měření zakřivených objektů a zvyšuje přesnost. Systém více kamer podporuje libovolný počet kamer od 1 až do 8. Systém využívá shlukový přístup kombinující snímky bez sešívání a využívající systém jedné globální osy. Vícekamerový systém s 8 kamerami je schopen pokrýt 360° válce a 4 kamery mohou měřit obě strany vzorku pro přesné určení ztenčení. [8]

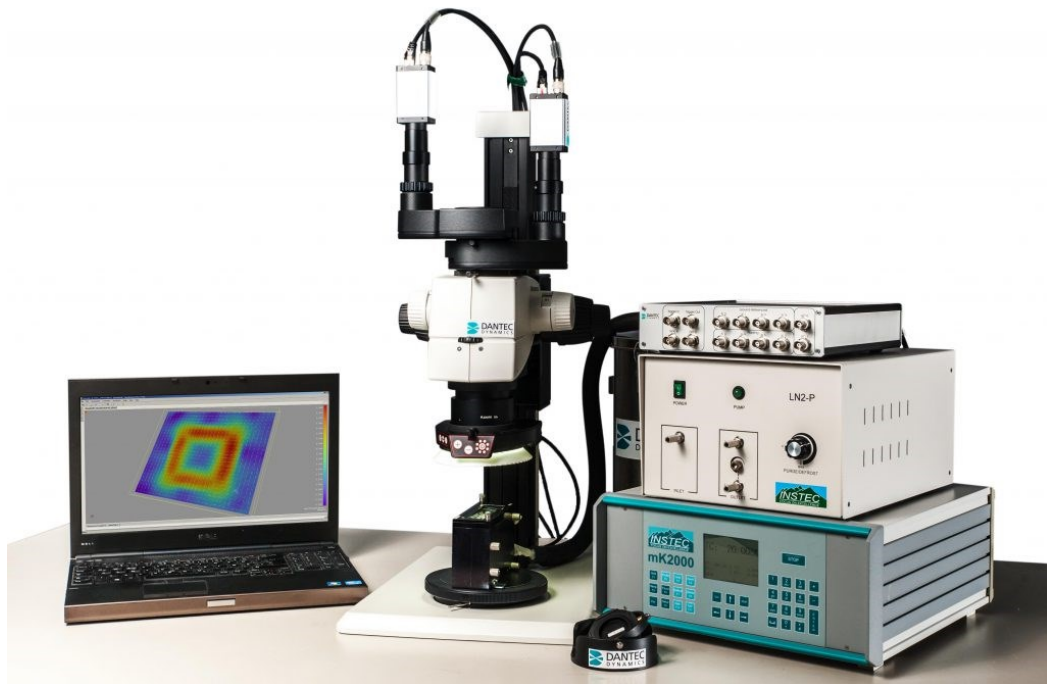


Obr. 5: 360 stupňové 3D měření posunů a deformací[8]

1.2.2 Mikro DIC

System mikro DIC je speciálně navržen pro měření deformace a tepelné roztažnosti v odvětví mikroelektroniky a jejich komponentů. Řešení pomáhá měřit přesnou deformaci v případech, kdy není možné provést simulaci nebo je nutné provést testování. Řešení se může dodávat například jako kompletní systém se stereomikroskopem, osvětlením, ohřívacím a chladicím stolem, kamerami a uživatelsky přívětivým měřicím softwarem. [9]

System umožňuje snadnou a rychlou 3D analýzu deformace a posunutí v celém poli. Výsledky zahrnují kompletní data o tvaru, deformaci a posunutí, časové a prostorové grafy, data virtuálních tenzometrů, data STL pro zpracování v CAD a také obrázky a filmy pro prezentační účely. Výsledkem je snadná a rychlá validace FEM, případně stanovení koeficientu tepelné roztažnosti prostřednictvím obrazové korelace tvaru, deformace a posunutí v reálném čase se submikronovou přesností. [9]



Obr. 6: zařízení mikro DIC – Q-400 od firmy Dantec Dynamics [9]

1.2.3 Vysokorychlostní DIC

System vysokorychlostního DIC je založen na technice digitální obrazové korelace a je určen především pro analýzu vibrací v celém poli a vysokorychlostních přechodových dějů. Díky tomu je ideální pro balistické zkoušky, lomovou mechaniku, rázové buzení, Hopkinsonův tyčový test nebo nárazové zkoušky. [10]



Obr. 7: nastavení kamer během Hopkinsonového tyčového testu [10]

Jedinečným způsobem se zde kombinuje vysoké prostorové rozlišení optických měření v celém poli s vysokým časovým rozsahem. Dynamický rozsah je zde od statického až po více než 100 000 Hz, přičemž je možné měřit posuny od mikronů až po metry. Rozlišení se obvykle pohybuje kolem 1 mikronu a 0,01 % deformace. System lze použít pro objekty libovolné velikosti jednoduchou výměnou optických čoček kamer. Různá rozšíření a aplikační příslušenství umožňují snadné použití digitálního 3D-korelačního systému při různých experimentech. Kalibrace se provádí stejným způsobem, jako u předchozího systému. [10]

2 DEFORMACE A NAPJATOST

Závislost mezi napětím a deformací je obecně popsána Hookovým zákonem. Hookův zákon v základním tvaru popisuje experimentálně zjištěný lineární vztah mezi napětími a deformacemi. Platnost Hookova zákona je zde omezena mezí úměrnosti. U pružných a plastických materiálů se tato mez často shoduje s mezí kluzu. [11]

U jednoosého namáhání lze Hookův zákon zapsat ve tvaru:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha_T \cdot \Delta T \quad (1)$$

Kde E je Youngův modul, α_T koeficient teplotní roztažnosti, ΔT rozdíl teplot, σ je napětí a ε je poměrné prodloužení. [11]

U rovinné deformace (dvouosé namáhání) pak lze zapsat:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) + \alpha_T \cdot \Delta T, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) + \alpha_T \cdot \Delta T, \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \cdot \tau_{xy}, \end{aligned} \quad (2)$$

Smykový modul G :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3)$$

Kde ν je Poissonovo číslo. [11]

U prostorové deformace (tříosé namáhání) potom lze uvést:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha_T \cdot \Delta T, & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \cdot \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha_T \cdot \Delta T, & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \cdot \tau_{yz} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha_T \cdot \Delta T, & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \cdot \tau_{zx} \end{aligned} \quad (4)$$

[11]

2.1 Deformace

Mezi částicemi látky jsou pevné vazby, které mají za následek, že si tělesa z těchto látek uchovávají svůj tvar. Vlivem působení vnějších sil může dojít k tomu, že se změní vzájemná poloha částic a dojde tak ke změně tvaru tělesa. Ne vždycky musí dojít ke změně tvaru, v určitých případech může vlivem působení vnější síly nastat také změna rozměrů nebo objemu. Ve všech těchto případech mluvíme o deformaci tělesa. [12]

Deformace popisují změny v délkách hran (jejich protažení) a změny v úhlech objemového prvku.

Vektor posunutí:

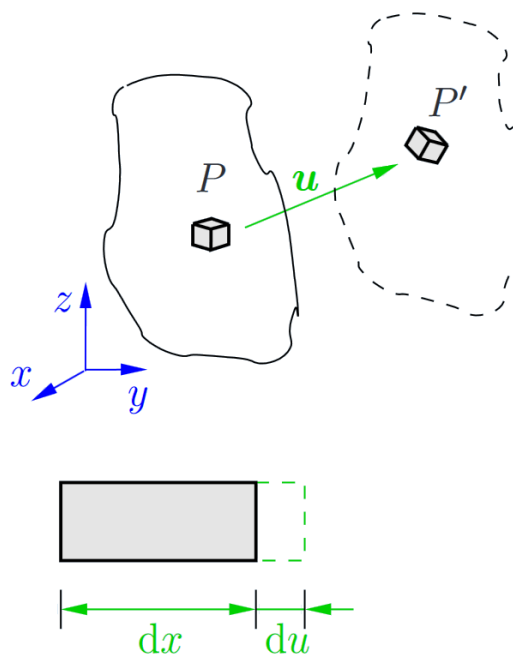
$$u = ue_x + ve_y + we_z \quad (5)$$

Kde u , v , w jsou složky posunutí.

2.1.1 Jednoosý deformační stav

Zde máme pouze jedno poměrné prodloužení. (obr. 8)

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (6)$$



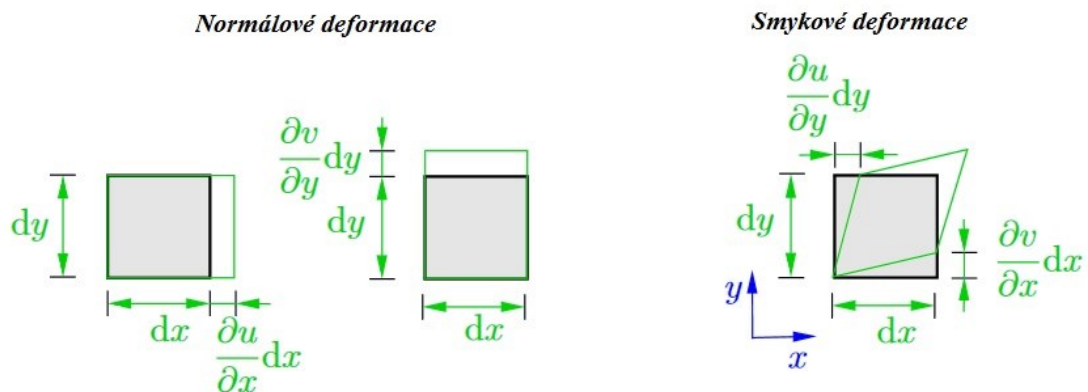
Obr. 8: deformace elementu[11]

2.1.2 Dvouosý deformační stav

Zde se vyskytuje poměrné prodloužení ve dvou osách, a to x a y .

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy},$$

$$\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}$$



Obr. 9: deformace při dvouosém napětí[11]

2.1.3 Tříosý deformační stav

Tady už dochází k poměrnému prodloužení ve všech třech osách, a to x , y a z . Deformací se mění vzdálenosti bodů, tvar tělesa a jeho částí. Deformace tělesa je zde určena deformací každého jeho trojrozměrného elementárního prvku. [11, 13]

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy}, \quad \varepsilon_z = \frac{dw}{dz},$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy}$$

$$\gamma_{zx} = \gamma_{xz} = \frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz}$$

Tensor deformace:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix},$$

2.1.4 Elastická deformace

Při elastické deformaci se po uvolnění vnějších sil, které zatěžují těleso, posunuté částice vrací do stavu, jež zaujímaly před zatížením. Tyto deformace jsou tedy vratné a po uvolnění sil se těleso vrací do svého původního tvaru. [12]

2.1.5 Plastická deformace

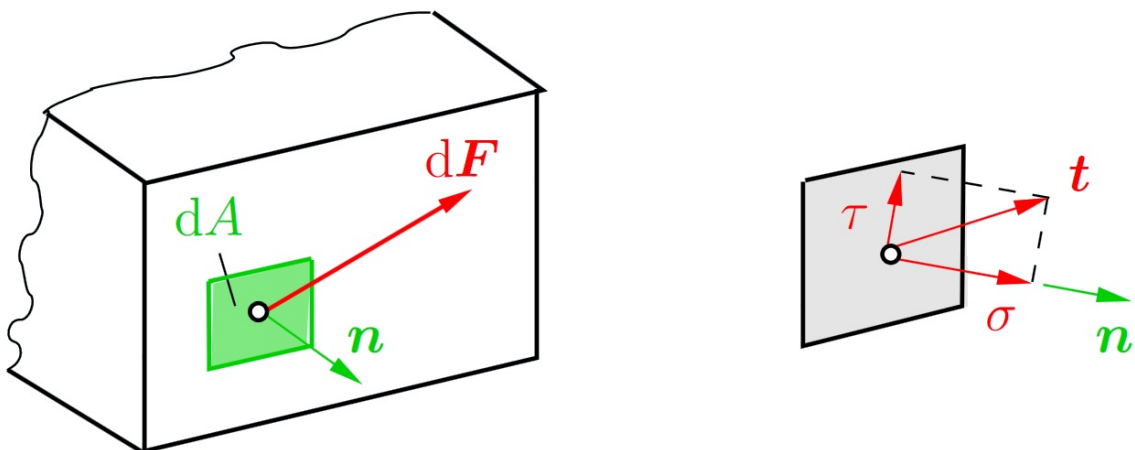
U plastické deformace dochází v důsledku působení vnějších sil k posunutí částic tělesa, které je zatěžováno, ve směru působení příslušných sil. Oproti případu elastické deformace se zde ale už částice nevracejí do původní polohy ani po skončení zatěžování danými silami. Deformace je tedy trvalá a nevratná. [12]

2.2 Napjatost

Napětí souvisí se silami rozloženými po celé ploše průřezu. Tenzor napětí t je definován jako:

$$t = \frac{dF}{dA} \quad (10)$$

Kde dF je síla působící na plochu elementu dA (jednotka je Pa = 1N/m²). Tenzor napětí zde závisí na orientaci plochy elementu (s normálou n).

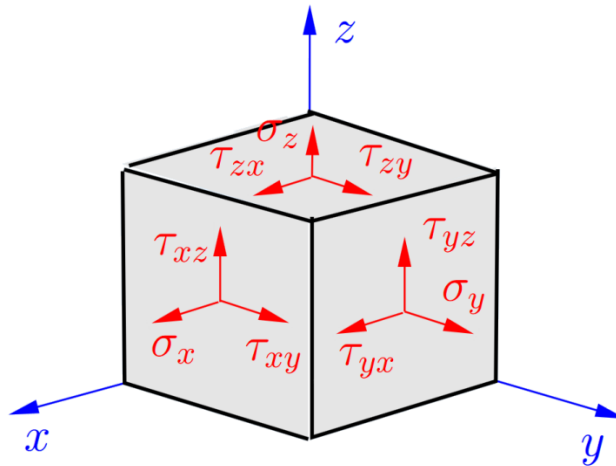


Obr. 10: vektor napětí a jeho složky [11]

Složky napětí jsou zde σ , což je normálové napětí, které působí ve směru kolmém na rovinu a τ , což je smykové napětí, které působí v rovině. [11,13]

2.2.1 Prostorová napjatost

V kterémkoliv bodě tělesa v pravoúhlé soustavě souřadnic xyz je prostorová napjatost obecně jednoznačně definována složkami tenzorů napětí ve třech vzájemně kolmých směrech. Jedná se celkem o devět složek napětí, tyto složky společně ve správném uspořádání tvoří tenzor napjatosti. [11,13]



Obr. 11: Element zatíženého tělesa se zaznačenými směry působících napětí[11]

Tenzor napjatosti:

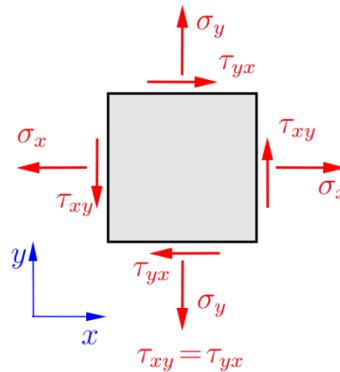
$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

Prvky, jež leží na hlavní diagonále, jsou složkami normálového napětí a značí se $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. Ostatní složky, které se nacházejí v tenzoru napjatosti, jsou složkami smykových napětí. Tenzor napjatosti je symetrický tenzor druhého řádu, kde platí $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. Platí zde tedy následující vztahy: [11,13]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (12)$$

2.2.2 Rovinná napjatost

V případě, že se jedno z hlavních napětí rovná nula, mluvíme o rovinné napjatosti. Rovinný stav napětí je jednoznačně definován složkami napětí ve dvou vzájemně kolmých řezech. Složky napětí ve třetím směru zde mizí (např. ve směru z: $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$).



Obr. 12: Složky a směry působení u rovinné napjatosti [11]

Za této situace má poté tenzor napětí tvar:

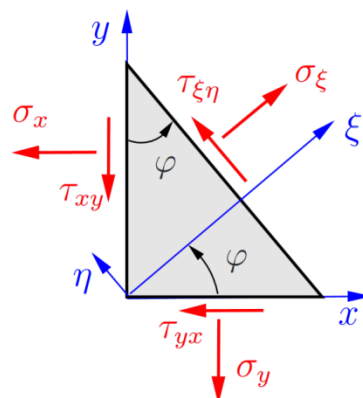
$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Transformace souřadnic u rovinné napjatosti:

$$\sigma_\xi = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\varphi + \tau_{xy} \sin 2\varphi,$$

$$\sigma_\eta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\varphi - \tau_{xy} \sin 2\varphi, \quad (14)$$

$$\tau_{\xi\eta} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\varphi + \tau_{xy} \cos 2\varphi.$$



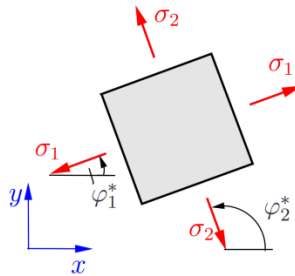
Obr. 13: transformování souřadnic u rovinné napjatosti [11]

Hlavní napětí poté lze zapsat jako:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tan 2\varphi^* = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$
(15)

Smyková napětí v těchto směrech mizí, hlavní směry jsou na sebe kolmé, platí zde $\varphi_2^* = \varphi_1^* \pm \frac{\pi}{2}$. [11,13]

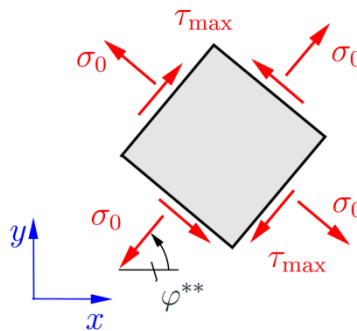


Obr. 14: směry působení hlavních napětí [11]

Maximální smyková napětí:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad \varphi^{**} = \varphi^* \pm \frac{\pi}{4}$$
(16)

V těchto řezech normálová napětí dosahují hodnot $\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$. [11,13]



Obr. 15: zaznačené maximální smykové napětí a složky σ_0 [11]

Invarianty:

$$I_\sigma = \sigma_x + \sigma_y = \sigma_\xi + \sigma_\eta = \sigma_1 + \sigma_2,$$

$$II_\sigma = \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2 = \sigma_\xi \sigma_\eta - \tau_{\xi\eta}^2 = \sigma_1 \sigma_2.$$
(17)

3 ELASTOMERY A JEJICH VLASTNOSTI

Elastomery spadají do skupiny polymerních materiálů, které mají specifické vlastnosti. Označení elastomer používáme pro zesíťovanou pryž, která již prošla procesem vulkanizace. Vulkanizace je chemický děj, během kterého dochází právě k síťování. Základní surovinou pro gumárenskou směs je kaučuk, podle požadovaných vlastností můžeme kombinovat i více druhů kaučuků do jedné směsi. Kromě kaučuku směs obsahuje samozřejmě i další složky. Plniva (např. saze) se přidávají především kvůli zlepšení mechanických vlastností (pevnost a tažnost), zpracovatelnosti směsi a ekonomické stránce. Lze je dělit na aktivní a neaktivní, aktivní jsou přidávány za účelem zlepšení vlastností a neaktivní za účelem snížení ceny výrobku. Změkčovadla jsou přidávány kvůli jejich schopnosti dodat ohebnost a tvárnost, tím zlepšují i zpracovatelnost, také umožňují přidat do směsi více plniv, což se vyplácí ekonomicky. Úkolem antidegradantů ve směsi je omezit vliv stárnutí a zhoršování technických vlastností s tím spojeným, rozeznáváme několik druhů, jako antioxidanty, které chrání proti působení kyslíku, antiozonanty, jenž chrání před působením ozonu a světelné stabilizátory, které chrání před UV zářením. Síťování se docílí vulkanizačními systémy, které velmi ovlivňují vlastnosti výsledného výrobku. Vulkanizační systém obsahuje konkrétně vulkanizační činidla, která jsou základní složkou a umožňují chemickou reakci (např. síra). Patří zde také aktivátory vulkanizace, ty zde aktivují účinek vulkanizačních činidel, dále urychlovače vulkanizace podstatně zkracují průběh vulkanizace. Poslední složkou vulkanizačního systému jsou retardéry vulkanizace, které především chrání směs před předčasným navulkanizováním v průběhu míchání a zpracovávání. [14,15,16,17]

Látky, které přidáváme do gumárenské směsi, volíme podle typu použitého kaučuku, je nutno uvažovat nad samotným zpracováním, zohlednit požadavky zákazníka a ekonomickou stránku věci. Při sestavování gumárenské směsi je tedy důležité znát konkrétní použití výsledného výrobku a požadované konečné vlastnosti. Vývoj kaučukové směsi tedy v první fázi zahrnuje připravení směsi dle požadavků zákazníka, následuje zkouška v provozu. Dle výsledků zkoušky je případně upravena směs a vyrobí se série zkušebních vzorků. Poté se můžou ještě podle odzkoušení výrobku v praxi upravit procesní podmínky nebo zdokonalit výrobní postup. Elastomery dnes můžeme označit za významný konstrukční materiál, který nachází uplatnění u mnoha výrobních oborů, u nejrůznějších přístrojů a zařízeních. Nejznámější a největší oblast použití je pravděpodobně v automobilovém průmyslu, při výrobě pneumatik. [14,15,16,17]

3.1 Kaučuk

Kaučuk tvoří nejdůležitější složku směsi, jedná se o makromolekulární látky různého chemického složení. Vždy je potřeba pro konkrétní aplikaci zvolit vhodný druh kaučuku, jenž bude splňovat vlastnosti budoucího produktu i se zohledněním ekonomické stránky. Výslednou směs se všemi přísadami je vždy nutné testovat a ověřit tak, že opravdu splňuje požadované vlastnosti. Kaučuky můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to na kaučuky přírodní a kaučuky syntetické. Dále pak můžeme kaučuky dělit na různé konkrétní druhy, které se vzájemně v určitých hlediscích liší svými vlastnostmi. [15,18,19]

3.1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se značí NR, zkratka pochází z názvu v anglickém jazyce, který zní natural rubber. Jde o v přírodě vyskytující se cis poly-isopren. Je to nejstarší druh kaučuku, nicméně stále pokrývá více, než 40% celkového objemu výroby, což v současné době činí něco přes jeden milion tun za rok, rozsah použití nadále roste. NR je vyráběn prostřednictvím pěstování stromů *Hevea Brasiliensis*, český název tohoto stromu je kaučukovník brazilský. Původ tohoto stromu je v Jižní Americe, ale dnes už jeho plantáže můžeme nalézt na různých místech po celém světě, kde je tropické klima. Ze stromu se získává latex prostřednictvím zářezů do kmene, poté následuje čepování. Z jednoho stromu se čepuje asi třicet let, poté začíná klesat výtěžnost. Do čerstvě získaného latexu se z důvodu stabilizace přidávají některé další látky, jako alkoholy, cukry nebo bílkoviny. V latexu se po čepování vyskytuje vysoké množství vody, proto se provádí koncentrace. Ta může být uskutečněna odstředěním, odpařením nebo rozvrstvením. [19,20]

Hlavní země, které produkují přírodní kaučuk, jsou aktuálně Thajsko, Indonésie, Malajsie, Indie, Vietnam a Čína. Přírodní kaučuk se vyznačuje širokým rozsahem tvrdosti, vysokou pevností, přirozeným samozpevňováním a má také dobrou odolnost proti anorganickým chemickým látkám. Nemá příliš velkou odolnost vůči ropě a organickým kapalinám, také špatně odolává ozonu. Maximální teplota použití tohoto kaučuku je do 75-100 °C. Používá se zejména pro pneumatiky nákladních a jiných větších vozidel, dále na různá těsnění nebo pásy pásových dopravníků. [19,20]

3.1.2 Syntetický kaučuk

Syntetické kaučuky se začaly vytvářet, jako alternativa k přírodnímu kaučuku. Vzniknutí syntetického kaučuku se datuje do první poloviny 20. století. Jedním z prvních syntetických kaučuků byly polybutadien s polyisoprenem a neoprenem. V porovnání s přírodním kaučukem se odlišují hlavně v technologii výroby. Syntetické kaučuky jsou vyráběny polymerací monomerů, které jsou získávány z petrochemických surovin. Jedná se tedy o chemický způsob výroby. Existují dvě velké skupiny syntetických kaučuků: kaučuky pro všeobecné použití a kaučuky speciální. [18, 19, 21]

3.1.2.1 Kaučuky pro všeobecné použití

Pro tyto kaučuky je typické, že se jich spotřebovává velký objem a mají poměrně nízkou cenu. Mezi jejich přednosti patří zejména dobrá odolnost proti oděru, pak také zvyšují pevnost a odrazovou pružnost výsledných pryží. Obecně je nelze používat za příliš vysokých teplot. Jejich použití můžeme nalézt v mnoha oblastech běžně používaných spotřebních výrobků, ve zdravotnictví, u výroby pneumatik, obuvi nebo nátěrových hmot. Patří sem butadienový kaučuk (BR), butadien-styrenový kaučuk (SBR), isoprenový kaučuk (IR) a etylen-propylenový kaučuk (EPM a EPDM). [18, 19, 21]

Butadienový kaučuk se vyrábí roztokovou polymerací, při níž je možno použít různých druhů kovových katalyzátorů, podle kterých má výsledný kaučuk vlastnosti. V praxi se kombinuje ve směsích především s NR a SBR. Butadien-styrenový kaučuk je vyráběn kopolymerací butadienu a styrenu, vlastnostmi se přibližuje NR, jeho elastické vlastnosti v porovnání s NR zaostávají, ale vlastnostmi jej převyšuje v tepelné vodivosti. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších kaučuků dnešní doby. Isoprenový kaučuk má ze syntetických kaučuků nejbližší vlastnosti přírodnímu kaučuku. V porovnání s NR méně lepí, převyšuje jej v tažnosti a jeho modul pružnosti v tahu je nižší. EPM a EPDM kaučuky mají lepší odolnost proti stárnutí, než zbylé kaučuky v této skupině, také odolávají vodě a povětrnostním podmínkám, vyznačují se taky elektroizolačními vlastnostmi. [18, 19, 21]

3.1.2.2 Kaučuky speciální

Tam, kde kvůli nedostatečným vlastnostem (odolnost vůči olejům nebo zvýšeným teplotám po delší dobu) kaučuků pro všeobecné použití je nemůžeme použít, aplikujeme kaučuky speciální. Lze je rozdělit do dvou skupin, kterými jsou olejovzdorné kaučuky a teplovzdorné kaučuky. Do olejovzdorných kaučuků lze zařadit Chloroprenový kaučuk

(CR), Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR), Akrylátový kaučuk (ACM) a Polysulfidový kaučuk (OT). CR kaučuky se vyznačují vysokou houževnatostí a dobrou odolností vůči hoření. Použití ku příkladu na výrobu lepidel, různých těsnění nebo klínových řemenů. O NBR kaučucích lze říci, že jsou nejlevnějšími olejovzdornými kaučuky. Použití mají zejména na těsnění v automobilovém průmyslu. ACM kaučuky jsou v porovnání s NBR dražšími, ale lze je používat až do teplot okolo 175°C, kdy stále dobře odolávají ropným palivům, mají však nižší pevnost. OT kaučuky se vyznačují asi nejlepší odolností vůči olejům, avšak nejsou teplovzdorné.

Mezi teplovzdorné kaučuky patří silikonové kaučuky (Q) a fluorouhlíkové kaučuky (FKM, FFKM). Silikonové kaučuky se dají použít u teplot od -60 °C do 205 °C, dobře se snášejí s lidským organismem. Fluorokaučuky mají nejlepší odolnost u zvýšených teplot. Nachází uplatnění tam, kde nám nestačí vlastnosti ostatních elastomerů, z důvodu jejich vysoké ceny. [18, 19, 21]

3.2 Vlastnosti elastomerních materiálů

Pro pryže je typická převážně amorfnní struktura nízká teplota skelného přechodu. Mají neuspořádané, klubkovité řetězce makromolekul. Při působení malých sil se silně deformují (100 % až 500 % nebo i více při zatěžování v tahu) a po uvolnění deformační síly přechází do původního stavu. Vyznačují se tedy vysokou pružností. Surový kaučuk je za běžných teplot tuhý a nepružný, v teplém prostředí lepí. Po procesu vulkanizace však elastomer nabyde velice elastických vlastností v širokém rozmezí teplot. Výsledné vlastnosti vzniklé pryže můžeme ovlivňovat složením gumárenské směsi a použitím jednotlivých přísad.

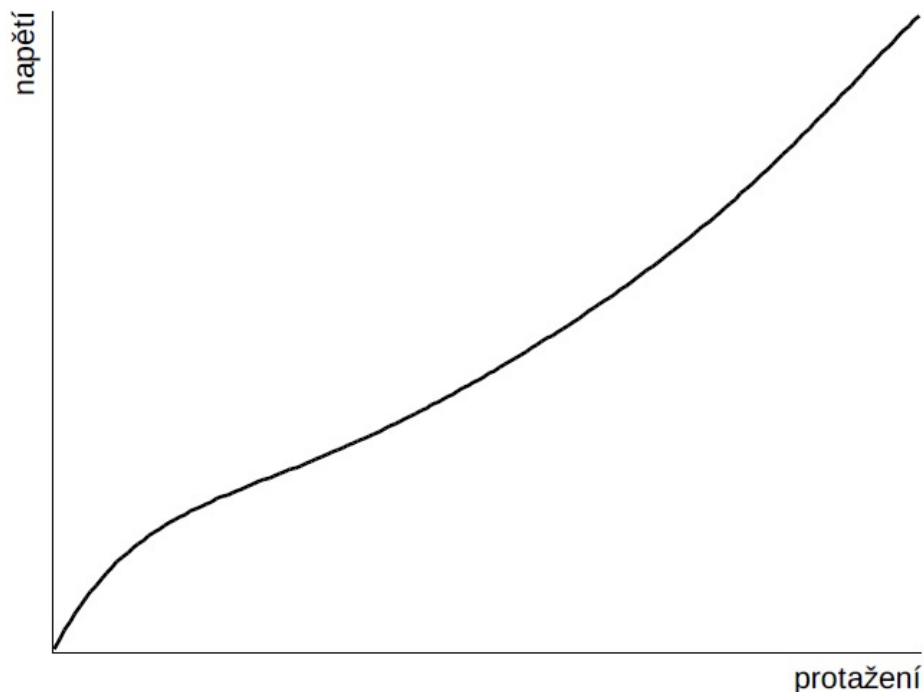
Fyzikální vlastnosti, jako je pružnost, pevnost, tvrdost, houževnatost a plasticita popisujeme v praxi následujícími veličinami: Youngův modul pružnosti v tahu E (MPa), smykový modul pružnosti G (MPa), Poissonovo číslo ν [-] a objemový modul pružnosti K (MPa). Uvedené vlastnosti se zjišťují experimentálním způsobem. Jak se chovají elastomery po mechanické stránce, souvisí úzce s teplotou, obecně pod -50°C tuhost materiálu značně roste a při teplotách nad 100°C tuhost značně klesá. Chemické vlastnosti zkoumané u elastomerů jsou stabilita, elektrické a elektromagnetické vlastnosti, nerozpustnost u tekutin a odolnost vůči vnějším vlivům v závislosti na okolním prostředí. [16, 19]

3.2.1 Hyperelastické chování

Hyperelastická je typická pro elastomery, je to vlastnost, která zahrnuje především vysokou elasticitu, kde výrazně vynikají v porovnání s ostatními materiály. [16]

Hyperelasticitu určují znaky:

- K dosažení deformace materiálu postačují malé síly, které na něj působí. V porovnání s ideálně elastickými materiály je zde poměr napětí a deformace při malých deformacích až desetitisíckrát menší.
- Dosahuje se velkých elastických deformací, ty jsou mnohonásobně vyšší, než je tomu u ideálně elastických materiálů. V době, kdy dojde k přetržení materiálu, obvykle dosahuje protažení až několik set procent vzhledem k původní délce.
- Nelineární závislost napětí na deformaci. Křivka této závislosti má charakteristický esovitý průběh (viz. Obr. 14).



Obr. 16: Závislost napětí na deformaci během zkoušení elastomerů

- Elastomerní látky se vyznačují zpravidla velmi vysokou objemovou tuhostí, Objemový modul pružnosti nabývá hodnot i několik tisíc MPa. Poissonovo číslo

nabývá hodnot blížících se 0,5, můžeme tedy říci, že elastomery považujeme za objemově nestlačitelné látky. [16]

Z uvedených vlastností můžeme tvrdit, že nelze použít Hookeův zákon, z důvodu, že závislost deformace na napětí není lineární a je zde výskyt velkých deformací. Vztah by se sice dal použít pro aplikace, kde se neuvažuje s velkými deformacemi, nicméně pro výpočty, kde je vyžadována větší přesnost nebo se vyskytnou větší deformace je zapotřebí použít nelineární popis závislosti napětí vůči deformaci. [16]

3.2.1.1 Hyperelastické modely

K popsání chování elastomerních materiálů se běžně používají hyperelastické modely. Od druhé poloviny 20. století se pracuje na různých teoriích hyperelastivity a jsou vyvíjeny jednotlivé modely. Ty jsou založeny na definici vztahu pro potenciál deformační energie W . S těmito modely se můžeme běžně setkat při modelování zátěžových situací u FEM programů. Volba konkrétního hyperelastického modelu pro danou aplikaci a materiál závisí na různých parametrech, jako jsou velikost deformace, stabilita modelu, identifikace a konzistence parametrů. [16,23]

Vztahem pro definování jednotlivých modelů je potenciál deformační energie, který se vyjádří pomocí funkcí:

- 1) deformačních invariantů

$$W = W(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \quad (18)$$

- 2) hlavních protažení

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\}) \quad (19)$$

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

Poměr deformované délky l_i ve směru osy i k původní délce l_0 se nazývá protažení a je značeno λ_i .

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} \quad (20)$$

Vztahy, které definují deformační invarianty jsou:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (21)$$

U nestlačitelných materiálů je hodnota invariantu I_3 rovna 1.

V případě, kdy známe funkci W , lze vypočítat napětí jako derivaci této funkce podle náležité složky deformace.

$$S_{ij} = 2 \frac{W}{C_{ij}} \quad (22)$$

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

Za předpokladu, že souřadný systém zvolíme takovým způsobem, že se shoduje s hlavními směry deformace, pak nastává situace, že je pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován následovně:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Z rovnice (7) lze tedy odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2 \frac{W}{I_1} C_{ij} - 2 \frac{W}{2} C_{ij}^{-1} \quad (24)$$

kde p je nspecifikovaný tlak, jenž závisí na okrajových podmínkách a δ_{ij} je Kronekerovo delta, u nějž platí ($\delta_{ij} = 1, i = j; \lambda_{ij} = 0, i \neq j$). [16]

Polynomický model vychází z deformačních invariantů I_1 a I_2 , jeho uplatnění je u deformací do 300%. Mooney-Rivlin model je v podstatě speciálním případem polynomické formy, má různé varianty, jež používají jiný počet parametrů. Nejběžněji se používá varianta dvouparametrová, aplikuje se pro tahové deformace do 100%. Ogden model je založen na funkci vyjádřené za pomoci hodnot hlavních protažení, aplikovat ho lze pro deformace až do 700%. Yeoh model je podobný polynomickému, ale není zde uplatněn druhý deformační invariant. Jeho hlavní výhodou je jeho jednoduchost. Arruda-Boyce model je rozšířená verze modelu Yeoh, aplikuje se pro deformace do 300%. Gent

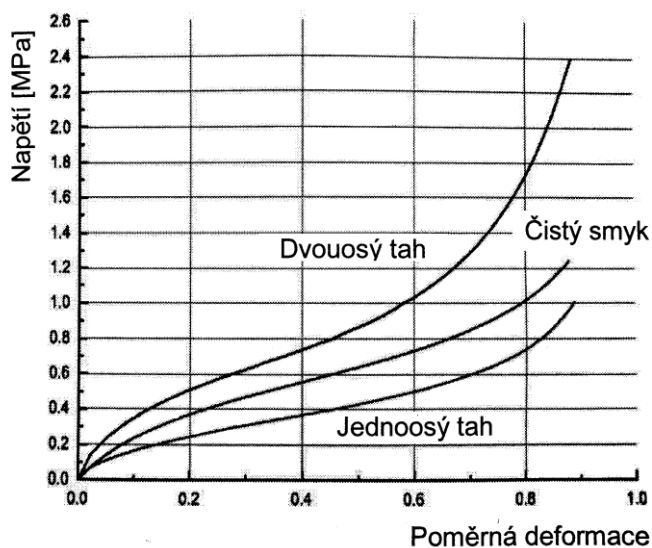
model užívá jen dvě materiálové konstanty a je schopen postihnout koncovou vyztužovací fázi napěťové deformační odezvy. Neo-Hookean model lze považovat za jeden z nejstarších a nejjednodušších modelů, v praxi lze aplikovat jen u deformací do 40% při jednoosém namáhání. [16]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY ELASTOMERŮ

Každý elastomerní materiál vykazuje unikátní vlastnosti pro dané složení směsi, to je způsobeno zejména velkým množstvím nejrůznějších přísad do gumárenských směsí, způsobem a podmínkami zpracování. Vlastnosti elastomerů je třeba mechanicky zkoušet, abychom zjistili mechanické vlastnosti a materiálové konstanty, které lze dále použít například u nelineárních hyperelastických modelů. Mechanické zkoušky tedy provádíme za účelem popsání a klasifikování vlastností konkrétního materiálu, který se zatěžuje definovanou silou či silami. Pro provádění jednotlivých základních zkoušek existují normy, které přesně stanovují jejich podmínky. To nám umožňuje opakovatelnost a porovnatelnost zkoušek pro různé soubory měření. [16, 28]

Během zkoušení elastomerních materiálů je zapotřebí dodržovat normalizované rychlosti změny velikosti zatěžující síly, která je vhodná pro daný typ zkoušky. Hodnoty naměřené u stejného materiálu by se při různých rychlostech změny velikosti zatěžující síly lišily. Důležité je také provádět zkoušky na zkušebních tělískách stejného tvaru a za stejných teplot. Teplota je často velmi zásadní pro vhodnost materiálu pro určitou aplikaci.

V praxi se aplikují pro získání mechanických vlastností tři typy statických mechanických zkoušek. Těmi jsou jednoosý tah, dvouosá napjatost a čistý smyk. U jednoosého tahu je podstata zkoušky namáhání a deformování tělesa, jež je zatíženo ve směru jediné osy. U dvouosé napjatosti je zkušební tělísko napínáno ve všech směrech roviny. U čistého smyku se zatížení aplikuje v jednom směru a současně je zabráněno změně šířky ve směru druhém. [16, 24, 28]



Obr. 17: Průběh křivek závislosti napětí na deformaci při jednotlivých zkouškách [16]

4.1 Zkouška jednoosé napjatosti

Jedná se o statickou zkoušku elastomerů, v praxi jde o tahovou zkoušku, která se uskutečňuje v souladu s normou ČSN ISO 37, kde je definován např. tvar, rozměry tělíska určeného pro zkoušku a doba zatěžování. Běžně je zkouška prováděna na univerzálních zkušebních strojích („trhačkách“), na kterých je zkušební tělísko tvaru oboustranných lopatek deformováno ve směru jediné osy neměnicí se rychlostí. Záznamové zařízení, které je součástí trhačího stroje vyhodnocuje průběžné změny fyzikální hodnoty, kterou sledujeme, potom lze stanovit charakteristiky zkoušeného materiálu. [16,24]

U zkoušky jednoosé napjatosti ze získaných hodnot stanovujeme následující veličiny:

Napětí v tahu

Jde o podíl síly F [N], jenž je působící kolmo na uvažovaný průřez, a původního průřezu S [m²]. Může se označovat také jako smluvní napětí, je značeno σ a jeho jednotkou jsou MPa. [16]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (25)$$

Poměrné prodloužení

Zde se jedná o poměr změny délky Δl (což je rozdíl měřené délky pracovní oblasti na zkušebním tělese ve stanoveném okamžiku vůči počáteční délce) k původní délce l_0 , kterou jsme naměřili na začátku, značíme jej písmenem ε a je udáváno v procentech. [16]

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

Tažnost

Značí se ε_p , udává se rovněž v procentech a je to poměrné prodloužení v momentě, kdy dochází k přetržení. [16]

$$\varepsilon_p = \frac{(l-l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (27)$$

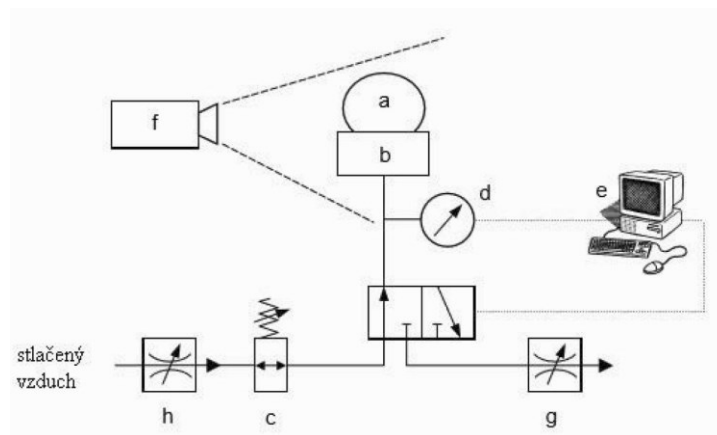
U elastomerů je velmi obtížné stanovit Youngův modul pružnosti E , což souvisí s nelineárním chováním těchto materiálů. V praxi se tedy zjišťuje modul v tahu, to je napětí, kterého je dosaženo při dosažení určitého předem zvoleného prodloužení. Hodnota modulu se neshoduje s hodnotou Youngova modulu pružnosti. Pevnost v tahu i modul mají

stejně jednotky a vyjadřují se v MPa. Prodloužení, při kterých je modul stanovován, se určují na základě jakosti elastomerů, jiné budou například u elastomerů s tažností do 400% a jiné u elastomerů s tažností nad 750%. [16, 24]

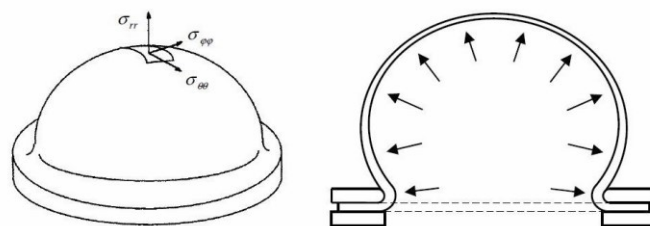
4.2 Zkouška dvouosé napjatosti

U zkoušky dvouosým zatížením se zkušební tělísko napíná do všech směrů roviny. Existuje více způsobů, jakými lze tohoto zkoušení docílit, například roztahováním čtvercového tělesa působením dvou sil ve dvou na sebe kolmých směrech nebo roztahováním kruhového tělesa radiálně, ve směru od středu zkušební tělesa. [16, 25]

Nejběžněji používaným a konstrukčně nejjednodušším řešením je však případ, kdy nafukujeme ploché zkušební tělísko pomocí stlačeného vzduchu. U tohoto řešení je obtížné zaznamenání deformací během zkoušky, stanovení tloušťky není jednoduché, z tohoto důvodu je zde zaváděna podmínka objemové nestlačitelnosti materiálu, abychom ji dokázali určit. [16, 25, 27]



Obr. 18: Zařízení určené pro zkoušku dvouosé napjatosti v případě nafukování zkušební tělíska [26]



Obr. 19: Nafukování zkušební tělíska u zkoušky dvouosé napjatosti [27]

Výpočet tloušťky při úvaze podmínky nestlačitelnosti materiálu:

$$t = \frac{t_0}{\lambda^2} \quad (28)$$

kde λ značí poměrné protažení, které vychází z rovnice (19), t_0 je zde původní tloušťka.

Jedná se v tomto případě o membránu, vztah pro napětí tedy získáme dosazením rovnice (28) do obecné rovnice membránového napětí:

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{2 \cdot t_0} \quad (29)$$

kde p značí tlak, který vyvozuje stlačený vzduch a působí na zkušební tělísko, r udává poloměr oblouku, λ je poměrné protažení, jenž vychází z rovnice (19) a t_0 je zde původní tloušťka. [16, 25, 27]

4.3 Zkouška tečení materiálu (Creep test)

Jako jednu z mechanických charakteristik lze uvést charakteristiku tečení. Jedná se o vlastnost, která vyžaduje hodnocení a je důležitá při zvolení správného materiálu do konkrétních aplikací, zejména pak tam, kde se výrobky ze zkoušeného materiálu používají při vysokých teplotách, například motory, pece nebo kotle. Creep je úkaz, kdy postupně dochází k deformaci materiálu, pokud na materiál delší dobu nepřetržitě působí konstantní zatížení. Může být příčinou poruchy nebo selhání průmyslových výrobků, při jejich dlouhodobém používání v některých případech. K tečení dochází proto, že každý materiál potřebuje určitý čas, aby se jeho molekuly usadily. Při deformaci se mění tvar krystalické struktury a zvyšuje se odpor proti deformaci, až se nakonec deformace zastaví. Po dosažení tohoto bodu se krystalická struktura musí ještě ustálit do svého konečného nastavení. Pokud na těleso působí větší síla, dochází k většímu tečení. Relaxace je změna napětí v polymeru s časem při konstantní deformaci, creep je změna deformace polymeru v závislosti na čase při konstantním napětí. Proto, aby bylo možné odhadnout životnost pryžového materiálu na základě zamýšlené aplikace, nebo k výběru materiálu vhodného pro daný účel je třeba provést porozumění charakteristikám tečení pryžových materiálů ve fázi vývoje návrhu. Zkouška tečení se tedy používá k měření deformace materiálu v průběhu času při konstantním namáhání a konstantní teplotě a podmínek prostředí. [29, 30, 31]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Účelem této diplomové práce bylo zjistit vlastnosti tečení pěti elastomerních materiálů (dále označeny jako materiál 1 - materiál 5) a jejich chování během jevu creep. Tyto vlastnosti byly zkoumány tak, že zkušební tělíska byly vždy zatíženy určitou silou, na které následovala výdrž delší dobu. Zkoumala se především hodnota protažení, které zkušební tělísko nabylo od doby dosažení dané zatěžující síly do doby ukončení testu. Zkouška tečení materiálu byla prováděna při dvou odlišných způsobech zatěžování. V prvním případě se jednalo o jednoosé zatížení a ve druhém případě se jednalo o dvouosé zatížení. Na základě zjištěných charakteristik tečení jednotlivých materiálů lze posoudit vhodnost použití daných materiálů pro určité aplikace, kde je třeba počítat s dlouhodobým zatížením výrobků, pro jejichž výrobu hledáme nejvhodnější materiál.

5.1 Zkoušené materiály

Materiál 1

Obsažené kaučuky: NR, BR, SBR. Obsah sazí: 66 dsk.

Materiál 2

Obsažené kaučuky: NR, BR. Obsah sazí: 60 dsk.

Materiál 3

Obsažené kaučuky: NR, BR, SBR. Obsah sazí: 60 dsk.

Materiál 4

Obsažené kaučuky: NR, BR, SBR. Obsah sazí: 55 dsk.

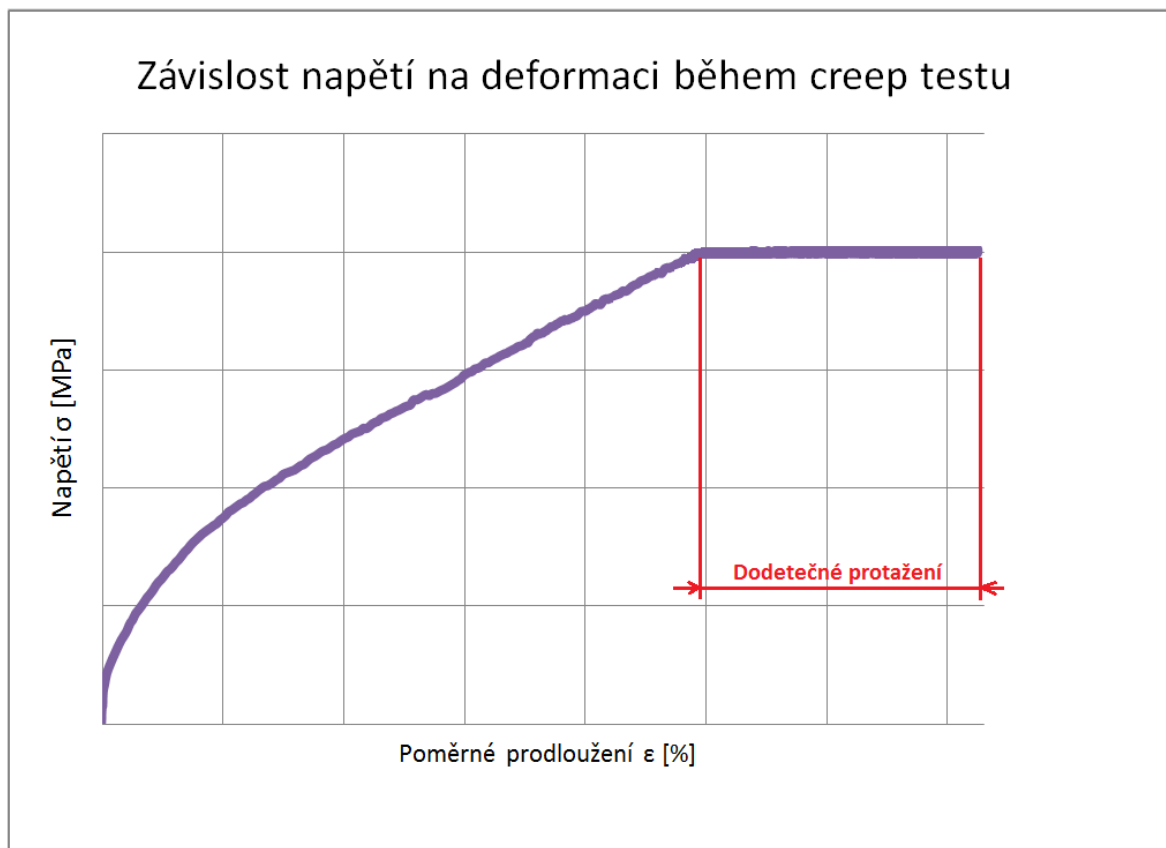
Materiál 5

Obsažené kaučuky: NR, BR, SBR. Obsah sazí: 53 dsk.

5.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení

Zkouška tečení materiálu během jednoosého zatížení probíhala na trhacím stroji ZWICK 1456 (více o tomto zařízení v kapitole 5.2.2) za laboratorních podmínek a teploty 20 °C. Podstata zkoušky spočívala v zatížení zkušebního tělíska určitým zatížením v jedné ose, při kterém dojde k protažení o danou hodnotu (jednalo se o 10%, 20%, 50% a 100% původní délky) a výdrži 10 min na této hodnotě zatížení (ideální průběh napětí vůči deformaci lze vidět na obr. 20). Měření protažení zde bylo snímáno extenzometrem.

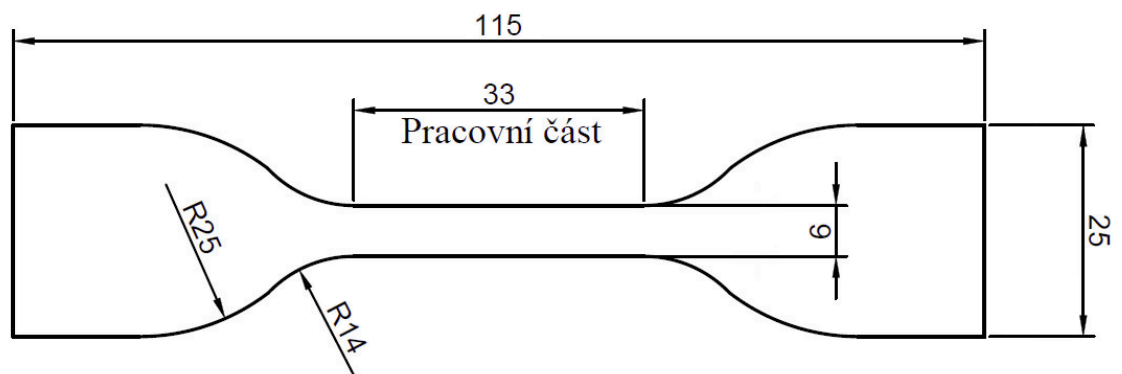
Zkoumalo se dodatečné protažení od doby dosažení tohoto zatížení po moment ukončení zkoušky (obr. 20).



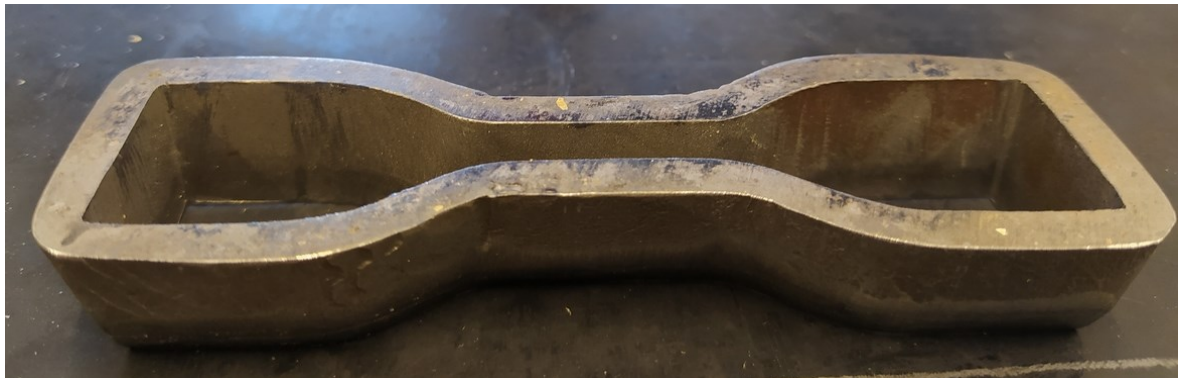
Obr. 20: Příklad grafu závislosti napětí na deformaci během zkoušky tečení materiálu

5.2.1 Výroba zkušebních tělísek

Zkušební tělíska určená pro tento typ zkoušky měla tvar oboustranných lopatek, jejich výroba probíhala na klasickém strojním lise (viz obr. 21), do kterého se vždy umístil pás připraveného elastomerního materiálu, z něhož bylo pomocí vysekávacího nože, který splňuje normu ČSN ISO 37 vystříhnuto jedno zkušební tělísko. Po získání zkušebního tělíska se lis uvolnil, pás materiálu posunul a proces se opakoval. Celkem bylo pro potřeby zkoušení potřeba vystříhnout 175 kusů těchto zkušebních tělísek, jednalo se o 35 kusů pro každý z pěti materiálů. U každého materiálu bylo vždy 15 zkušebních tělísek použito ke stanovení hodnot zatížení pro zkoušku tečení materiálu, aby se dosáhlo přibližně požadovaného počátečního protažení u daného materiálu. 20 zkušebních tělísek potom bylo určeno pro samotné zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení, vždy 5 pro dané zatížení.



Obr. 21: Tvar a rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku tečení materiálu s jednoosým zatížením



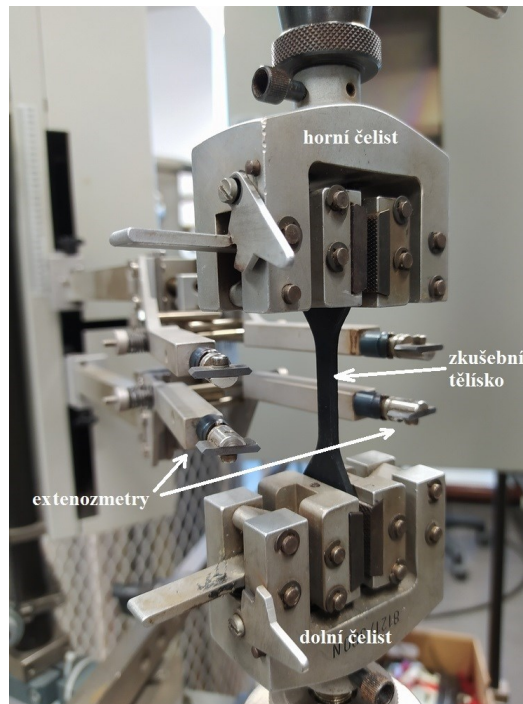
Obr. 22: Použitý vysekávací nůž splňující normu ČSN ISO 37



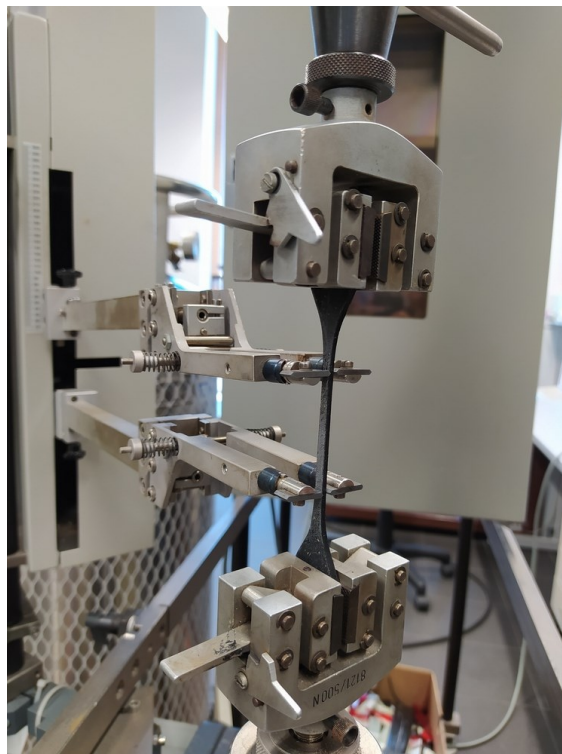
Obr. 23: Použitý strojní lis pro výrobu zkušebních tělísek

5.2.2 Popis zkušebního zařízení

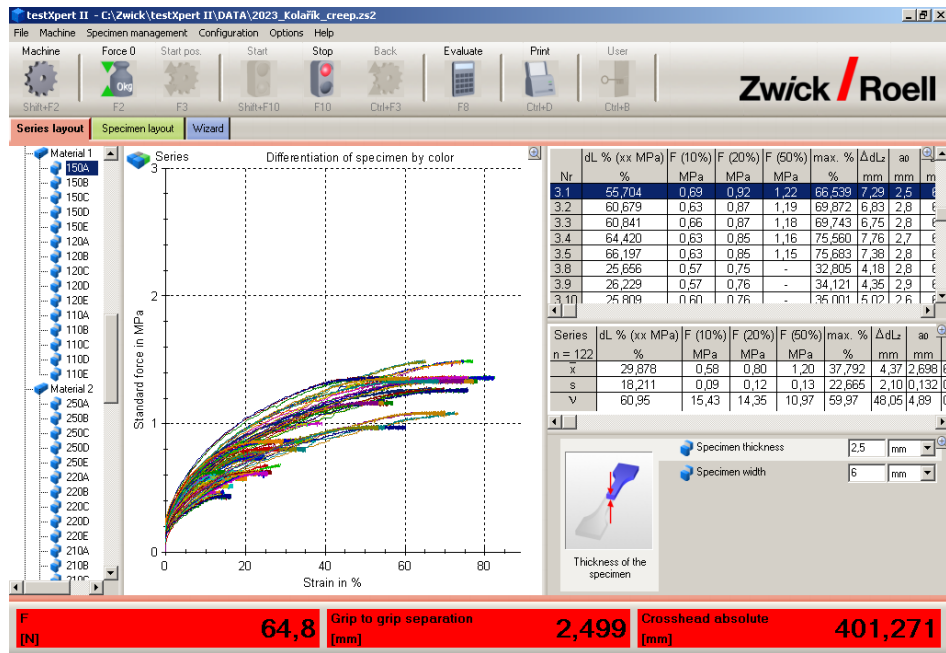
Zkušební zařízení, na kterém se prováděla tato zkouška má název ZWICK 1456, maximální možná síla zatížení je zde 20 kN, maximální posuvová rychlost 800 mm za minutu. Zařízení používá software testXpert II.



Obr. 24: Upnuté zkušební tělísko v trhacím stroji ZWICK v nezatíženém stavu

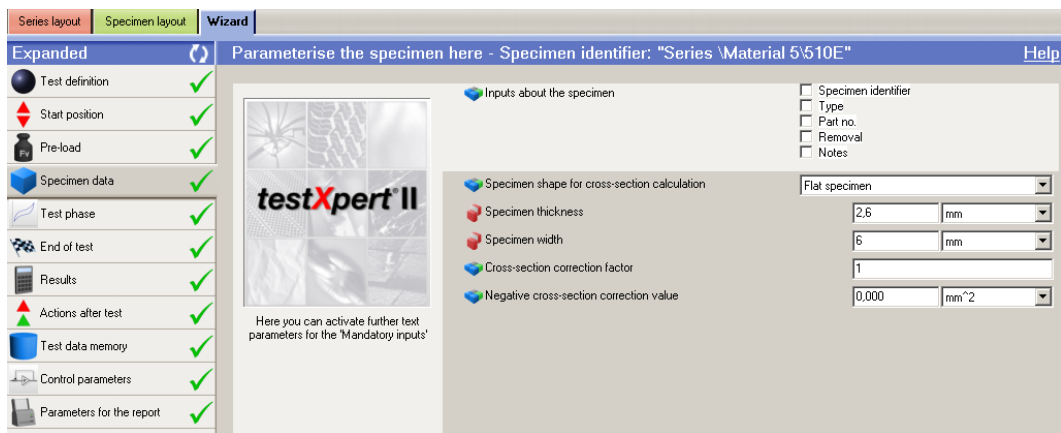


Obr. 25: Zkušební tělísko v zatíženém stavu během zkoušky tečení materiálu

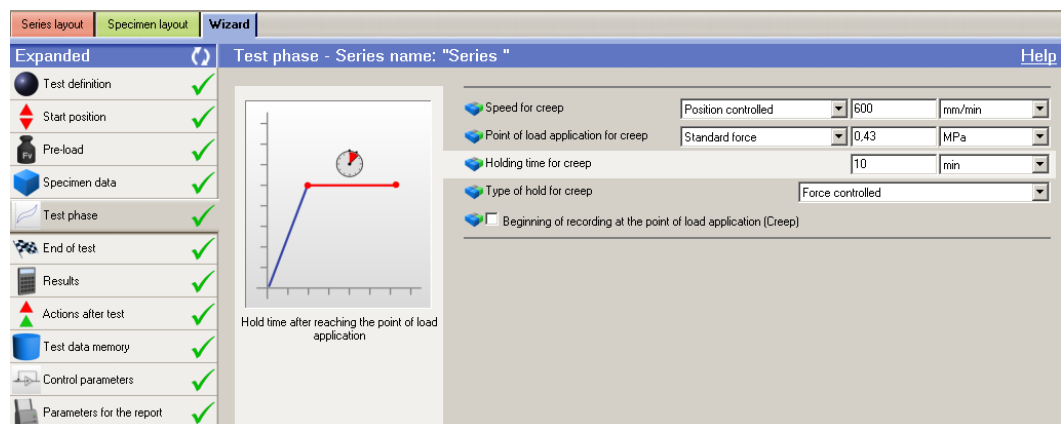


Obr. 26: Prostředí programu testXpert II

Zkušební tělíska měla proměnlivou tloušťku, proto bylo třeba nastavit pro každé jednotlivé tělísko v softwaru odpovídající tloušťku.



Obr. 27: Nastavení parametrů zkušebního tělíska



Obr. 28: Nastavení průběhu zkoušky tečení materiálu

5.2.3 Pracovní postup

- 1) V prvním kroku se připravila zkušební tělíska, tato operace se prováděla na mechanickém lisu s použitím nože tvaru budoucích zkušebních tělísek (viz kapitola 5.2.1).
- 2) Dále bylo třeba stanovit hodnotu zatěžujícího napětí při konkrétních hodnotách protažení (10%, 20%, 50% a 100%) pro každý materiál, proto se nejprve provedla standardní tahová zkouška. U každého materiálu byla tato zkouška provedena na třech zkušebních tělískách, ze kterých se pro další postup použila střední hodnota napětí u konkrétních protažení. Medián těchto hodnot je zaznamenán v tabulce 1.

Tab. 1: Naměřené hodnoty napětí během standardní tahové zkoušky pro jednotlivé materiály

Střední hodnoty napětí σ při jednotlivých poměrných prodlouženích [MPa]				
Název	$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 20\%$	$\varepsilon = 50\%$	$\varepsilon = 100\%$
Materiál 1	0,6	0,87	1,36	2,28
Materiál 2	0,7	0,97	1,48	2,37
Materiál 3	0,57	0,82	1,29	2,11
Materiál 4	0,72	1	1,49	2,35
Materiál 5	0,46	0,66	1,07	1,69

- 3) V dalším kroku se provedla ještě „náběhová zkouška“ za účelem získání přesnějších hodnot napětí při daných poměrných prodlouženích pro zkoušku tečení materiálu. Při standardní tahové zkoušce se lišil čas, během kterého se dosáhlo napětí u daného prodloužení, u creep testu se zvoleného zatížení, na které následuje výdrž, docílilo za nepatrně delší dobu v porovnání s klasickou tahovou zkouškou. Zde již byla zkouška provedena se stejnými podmínkami, jako tomu bylo u následných zkoušek tečení materiálu. Zkouška se opět provedla na třech zkušebních tělískách a stanovila se střední hodnota z dosažených výsledků. Došlo tedy k mírné korekci původních hodnot z tahové zkoušky. Získané hodnoty byly použity dále pro zkoušky tečení materiálu, napětí pro jednotlivé materiály jsou zaznamenány v tabulce 2.

Tab. 2: Zkorigované hodnoty napětí použité pro zkoušky tečení materiálu

Zkorigované střední hodnoty napětí σ při jednotlivých poměrných prodlouženích [MPa]				
Název	$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 20\%$	$\varepsilon = 50\%$	$\varepsilon = 100\%$
Materiál 1	0,57	0,80	1,26	2,00
Materiál 2	0,60	0,86	1,35	2,20
Materiál 3	0,51	0,73	1,16	2,10
Materiál 4	0,62	0,86	1,33	2,10
Materiál 5	0,43	0,61	0,97	1,55

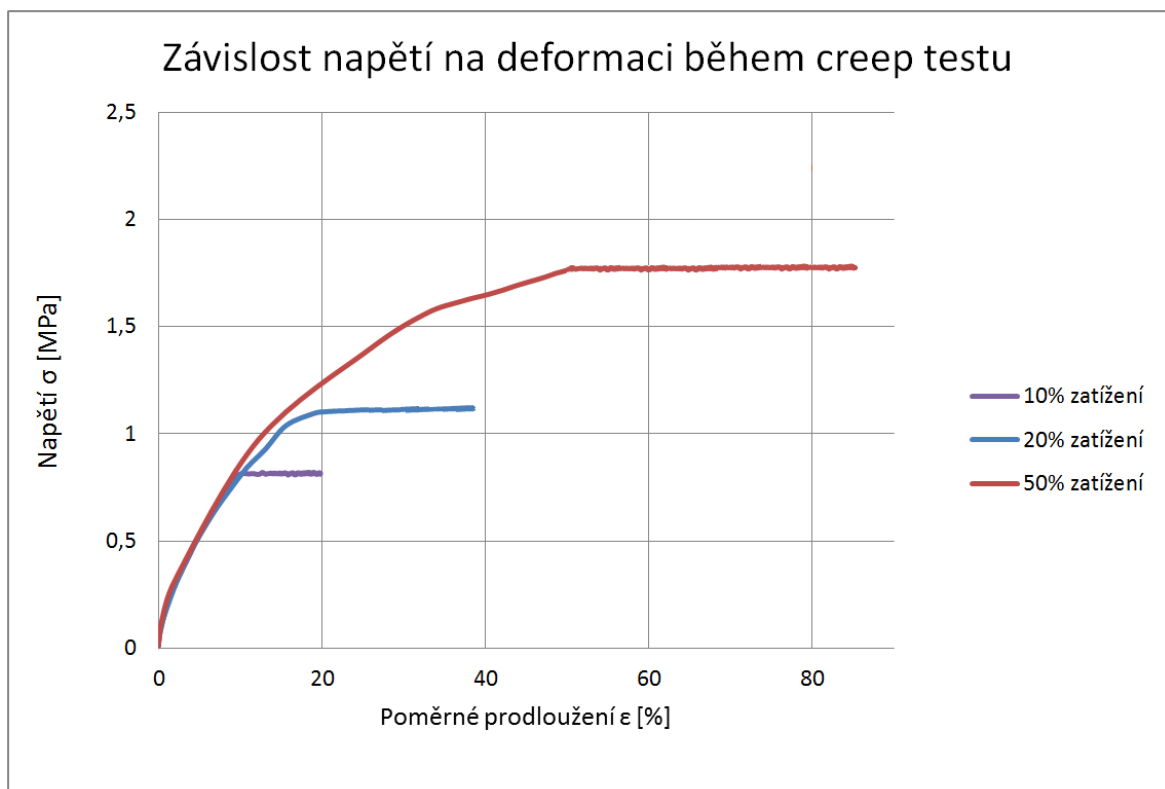
- 4) Dalším krokem již byla samotná zkouška tečení materiálu, kdy se nejprve nastavily všechny požadované parametry v softwaru, jako rychlost posuvu čelistí, doba výdrže na hodnotě napětí 10min atd. Na počátku se nastavila hodnota zatížení, kterou má zkušební stroj držet pro počáteční poměrné prodloužení $\varepsilon = 10\%$ (viz tabulka 2) a po jednom zkušebním tělísku se postupně otestovalo všech 5 zkušebních tělísek určených pro danou hodnotu zatížení. Poté se v softwaru vždy přenastavila hodnota zatížení (pro počáteční poměrné prodloužení $\varepsilon = 20\%$, $\varepsilon = 50\%$ a $\varepsilon = 100\%$) a otestovalo 5 zkušebních tělísek s výdrží na dané hodnotě zatížení.
- 5) Po otestování všech zkušebních tělísek z jednoho materiálu se přešlo na zkušební tělíška z dalšího materiálu a postupovalo stejným způsobem.

5.2.4 Vyhodnocení výsledků

Zpracování a vyhodnocování výsledků se provádělo na základě výše uvedených informací. Pro každý elastomerní materiál bylo naměřeno vždy 5 hodnot u každé zkoušky tečení materiálu daným jednoosým zatížením, která odpovídala počátečnímu poměrnému prodloužení $\varepsilon = 10\%$, $\varepsilon = 20\%$, $\varepsilon = 50\%$ a $\varepsilon = 100\%$. Vycházelo se tedy vždy z pěti hodnot pro každý jednotlivý materiál a konkrétní zatížení. U získaných hodnot byl vypočítán variační koeficient, který je definován, jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Pro prezentování konečných výsledků byla zvolena střední hodnota ze souborů naměřených hodnot, tedy medián. Výsledky byly v další části práce pro přehlednost zaneseny do tabulek a grafů.

5.3 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení

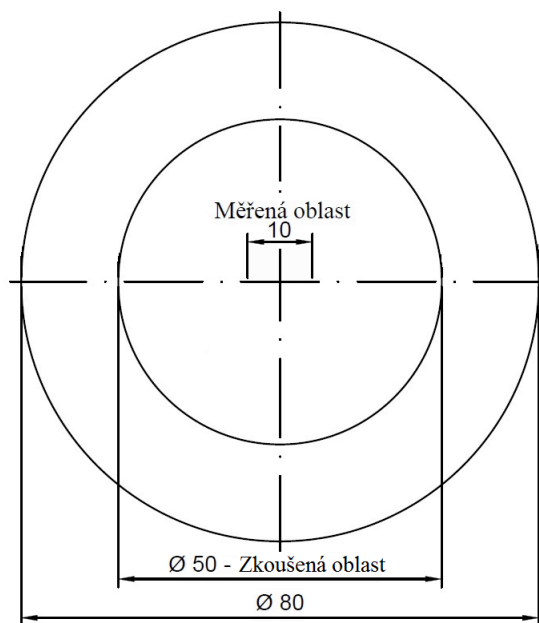
Creep test během dvouosého zatížení se uskutečnil za pomoci zařízení, kde se nafukovalo ploché zkušební tělísko kruhového tvaru za pomoci stlačeného vzduchu (zařízení blíže popsáno v kapitole 5.3.2). Měření probíhalo za laboratorních podmínek a rovněž teploty 20°C, jako tomu bylo u jednoosého zatížení. Zkouška probíhala obdobným způsobem, jako u jednoosého zatížení, s tím rozdílem, že zde tělísko bylo zatíženo ve dvou osách, což bylo docíleno za pomoci stlačeného vzduchu (tlak se postupně zvětšoval až do určité hodnoty tlaku, na které následovala výdrž). Zatížení zkušebního tělíska bylo opět vždy zatížením, při kterém dojde k protažení o danou hodnotu (jednalo se o 10%, 20% a 50% původní délky) a následovala výdrž 10 min na této hodnotě zatížení. Zkoumalo se stejně, jako v předchozím případě dodatečné protažení od doby dosažení tohoto zatížení po moment ukončení zkoušky. Měření protažení zde zajišťovalo zařízení DIC s kamerovým systémem.



Obr. 29: Příklad grafu závislosti napětí vůči deformaci během zkoušky tečení materiálu, zaznamenaný průběh pro různá zatížení ve stejném grafu

5.3.1 Výroba zkušebních tělísek

Pro tento typ zkoušky měla zkušební tělíska kruhový tvar o vnějším průměru 80 mm, kdy plocha určená pro zkoušku měla průměr 50 mm (viz obr. 30). Část zkušebního tělíska mezi průměrem 50 mm a 80 mm sloužila pro upnutí tělíska ve zkušebním zařízení. Bylo třeba připravit celkem 80 zkušebních tělísek, vždy 16 pro každý jednotlivý materiál. Jedno zkušební tělísko bylo vždy použito ke stanovení hodnoty tlaku, kdy zatížení pro daný materiál odpovídalo určitému počátečnímu poměrnému prodloužení materiálu. 15 zkušebních tělísek potom bylo použito pro zkoušku tečení materiálu. Zkušební tělíska se před začátkem měření vždy musela opatřit bílým skvrnitým vzorem, čehož se docílilo za pomoci spreje a fixy, aby kamery mohly správně rozpoznat jednotlivá místa na zkušebním vzorku. Konkrétně se jednalo o tři body, pomocí unikátních oblastí v blízkém okolí těchto bodů počítač provedl výpočet a měřil protažení.



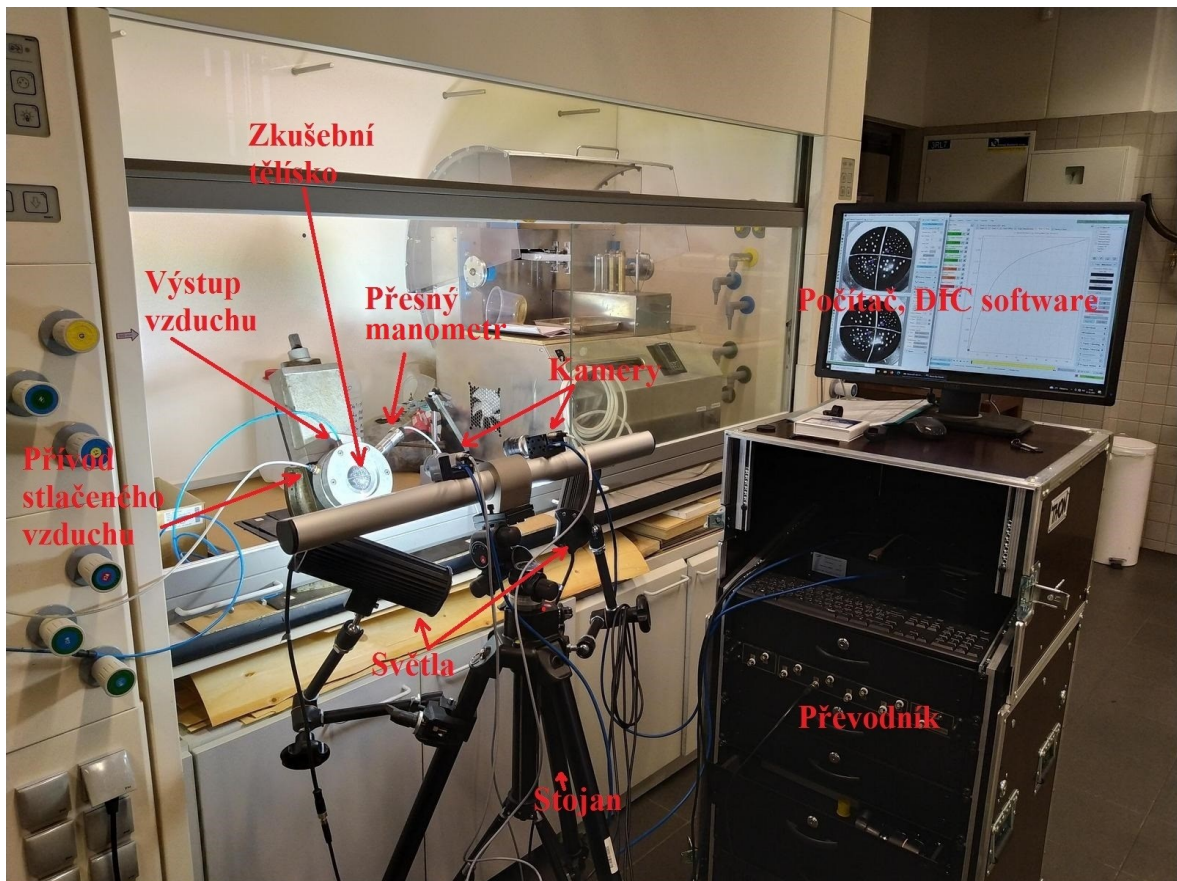
Obr. 30: Tvar a rozměry zkušebního tělíska určeného pro zkoušku tečení materiálu při dvousém zatížení



Obr. 31: Použitý vysekávací nůž pro výrobu zkušebních tělísek určených pro zkoušku tečení materiálu během dvouosého zatížení

5.3.2 Popis zkušebního zařízení

Zkouška tečení materiálu při dvouosém zatížení byla uskutečněna na zařízení speciálně vyvinutém pro zkoušky dvouosé napjatosti elastomerů. Zařízení se skládá z počítače opatřeným příslušným softwarem pro DIC měření (v tomto případě se jedná o program Mercury RT), dále dvou kamer (použité kamery jsou od značky Basler a mají rozlišení 5 MPx), přívodu stlačeného vzduchu, manometru (tento konkrétní manometr má označení BD Sensors DMP 33 li, jeho rozsah měření je 0 – 6 barů a přesnost 0,125 %FSO), analogově-digitálního převodníku (slouží pro propojení manometru se zbytkem zařízení) a stojanu se dvěma světly, které zajišťují ideální osvětlení zkušebního tělíska během měření. Zařízení můžeme vidět na obrázku 32.

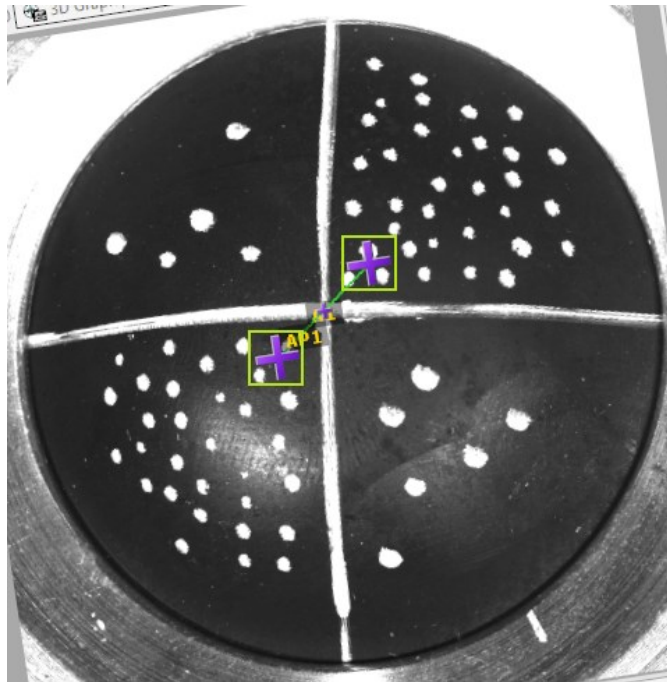


Obr. 32: Zkušební zařízení pro uskutečnění zkoušky tečení během dvouosého zatížení

Zkoušené tělísko se vždy upne mezi dva kovové prstence, zajistí pomocí šesti šroubů umístěných po obvodu prstenců a následně se přivádí z vnitřní strany zkušební vzorku stlačený vzduch. Tímto postupem dochází k nafukování vzorku, software v průběhu celé zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení měří tlak (pomocí manometru BD Sensors DMP 33 li připojeným přes převodník) a zachycuje průběh deformování tělíska.

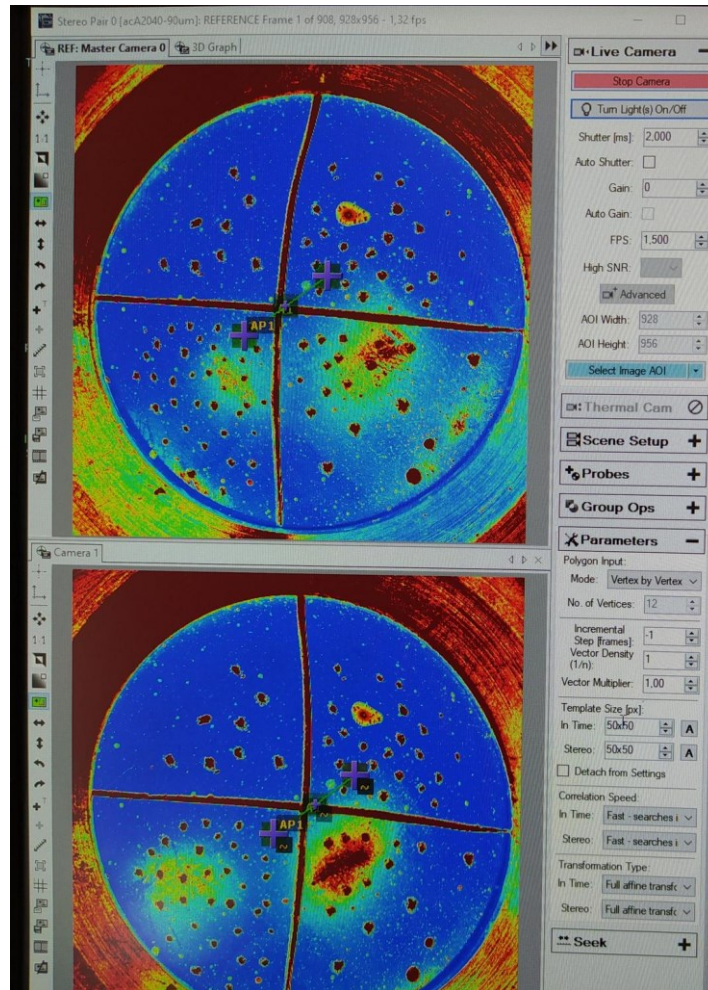
5.3.3 Pracovní postup

- 1) Prvním krokem bylo připravení zkušebních tělísek, to se uskutečnilo opět na stejném mechanickém lisu (viz obr. 23), nicméně tentokrát s použitím nože kruhového tvaru (viz kapitola 5.3.1)
- 2) Poté bylo pro dobrou možnost vyhodnocování průběhu zkoušky kamerovým systémem třeba opatřit zkušební tělíska dvěma bílými čarami vedenými středem, které umožňují současně snadné umístění zkušebního tělíska do středu prstenců při upínání a bílým skvrnitým vzorem.



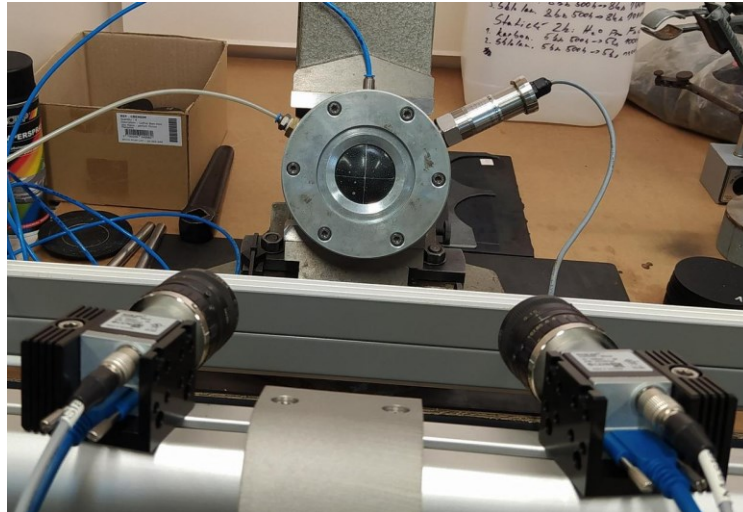
Obr. 33: Upnuté zkušební tělísko opatřené skvrnitým vzorem na střed, fialové křížky znázorňují body, mezi kterými se vyhodnocuje protažení. Zelené čtverečky znázorňují tzv. fazety.

- 3) Dále následovalo zapojení zkušebního zařízení s veškerým příslušenstvím. Bylo třeba propojit přívod a výstup stlačeného vzduchu, umístit manometr, který se propojil pomocí kabelu rovněž s převodníkem umístěným v kufru s DIC zařízením. Kamery se umístily na stojan do vhodné vzdálenosti od měřeného vzorku a všechno, včetně světel se pomocí kabelů opět propojilo s počítačem. Pro správné měření bylo důležité rozmístění veškerých komponentů, jako vzdálenost kamer, jejich úhel a nasměrování světel pro ideální osvětlení. Kamery byly také vzájemně propojeny pro synchronizaci obrazu během měření, jedna kamera měla roli „master“ a druhá „slave“.
- 4) Jakmile bylo vše zapojeno a rozmístěno, následovalo zaostření kamer a provedla se kalibrace za použití kalibrační mřížky (viz obr. 4). Kalibrace zahrnovala nasnímání kalibrační mřížky v různých polohách (mřížka se natáčela a nakláněla v různých směrech). Snímky se následně zkontrolovaly a vyřadily se případné snímky s velkou odchylkou.
- 5) Následovalo nastavení jednotlivých parametrů měření v programu, jako počet snímků za sekundu, nakreslení čar (které vytvořily dva koncové body a středový bod), určení velikosti fazet (oblast kolem bodů) nebo správné osvětlení zkušebního tělíska.



Obr. 34: Prostředí programu Mercury RT během nastavení správného osvětlení, nahoře pohled jedné kamery, pod ní pak pohled z druhé kamery. Červená barva značí místa s vysokou mírou osvětlení, modrá pak místa s malým osvětlením. V pravém dolním rohu můžeme vidět nastavení velikosti fazet, v tomto případě 50x50 px.

- 6) Před zahájením zkoušky tečení materiálu se nejprve otestovalo od každého materiálu jedno zkušební tělíčko ke stanovení přibližných hodnot tlaku při konkrétních hodnotách protažení (10%, 20% a 50%).

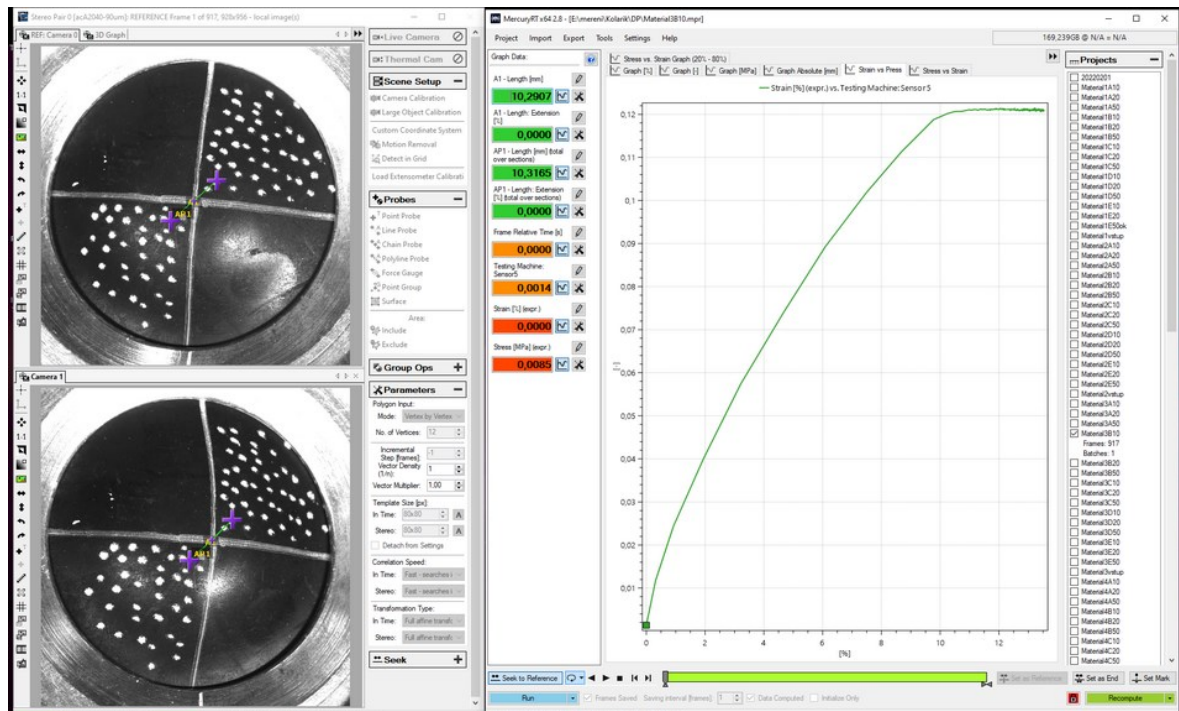


Obr. 35: Pohled na upevněný vzorek ve zkušebním zařízení z poza kamer

- 7) Následně se mohlo přejít k samotné zkoušce tečení materiálu s dvouosým zatížením. Vždy se upnulo zkušební tělísko, vhodně umístily body v programu a započala zkouška. Zkušební tělísko se postupně zatížilo zjištěným tlakem pro protažení $\varepsilon = 10\%$, na kterém následovala výdrž 10 minut. Otestováno bylo postupně vždy pět zkušebních tělísek pro tento tlak, poté byla přenastavena hodnota tlaku podle požadované počáteční hodnoty protažení a otestováno dalších pět zkušebních tělísek pro počáteční protažení $\varepsilon = 20\%$ a pět pro $\varepsilon = 50\%$.



Obr. 36: ovládání stlačeného vzduchu k nastavení požadované hodnoty tlaku a zatížení



Obr. 37: Prostředí programu Mercury RT během zkoušky tečení materiálu s dvouosým zatížením (vlevo vidíme obraz z kamer, na pravé straně pak průběh zkoušky).

- 8) Jakmile byla otestována všechna zkušební tělíska z prvního materiálu, postupovalo se stejným způsobem pro ostatní materiály.

5.3.4 Vyhodnocení výsledků

Zpracování a vyhodnocování výsledků se provádělo obdobně, jako u zkoušky tečení materiálu s jednoosým zatížením. Pro každý elastomerní materiál bylo opět naměřeno vždy 5 hodnot u každé zkoušky tečení materiálu daným dvouosým zatížením, která odpovídala počátečnímu poměrnému prodloužení $\varepsilon = 10\%$, $\varepsilon = 20\%$ a $\varepsilon = 50\%$. Vycházelo se tedy vždy z pěti hodnot pro každý jednotlivý materiál a konkrétní zatížení. Zde byl rovněž u získaných hodnot vypočítán variační koeficient, tedy podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Presentování výsledků se stejně, jako v předchozím případě uskutečnilo prostřednictvím střední hodnoty ze souborů naměřených hodnot. Výsledky byly v kapitole 6 přehledně zpracovány do tabulek a grafů.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

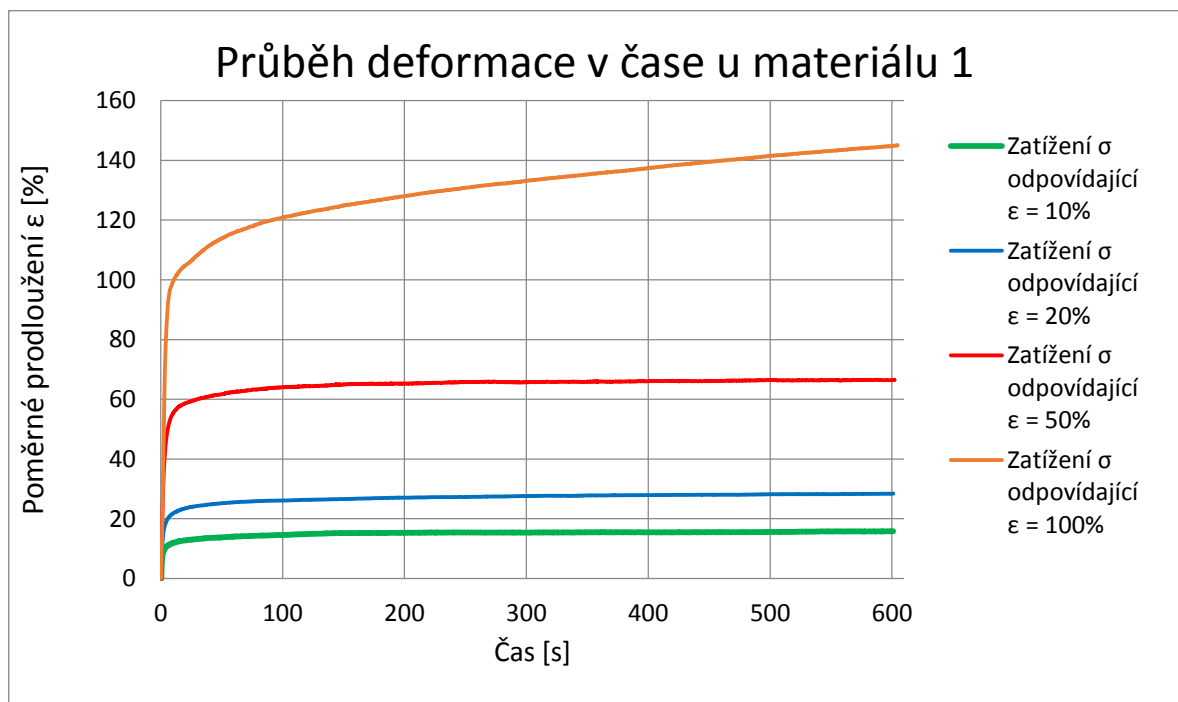
6.1 Materiál 1

Směs označená jako materiál 1 obsahovala kaučuky přírodní (NR), butadienový (BR) a butadien-styrenový (SBR). Obsah sazí zde byl 66 dsk (díly na sto dílů kaučuku).

6.1.1 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení

Tab. 3: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 1

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	5,71	11,79
$\epsilon_0 = 20\%$	7,92	9,36
$\epsilon_0 = 50\%$	9,41	8,87
$\epsilon_0 = 100\%$	42,97	4,65

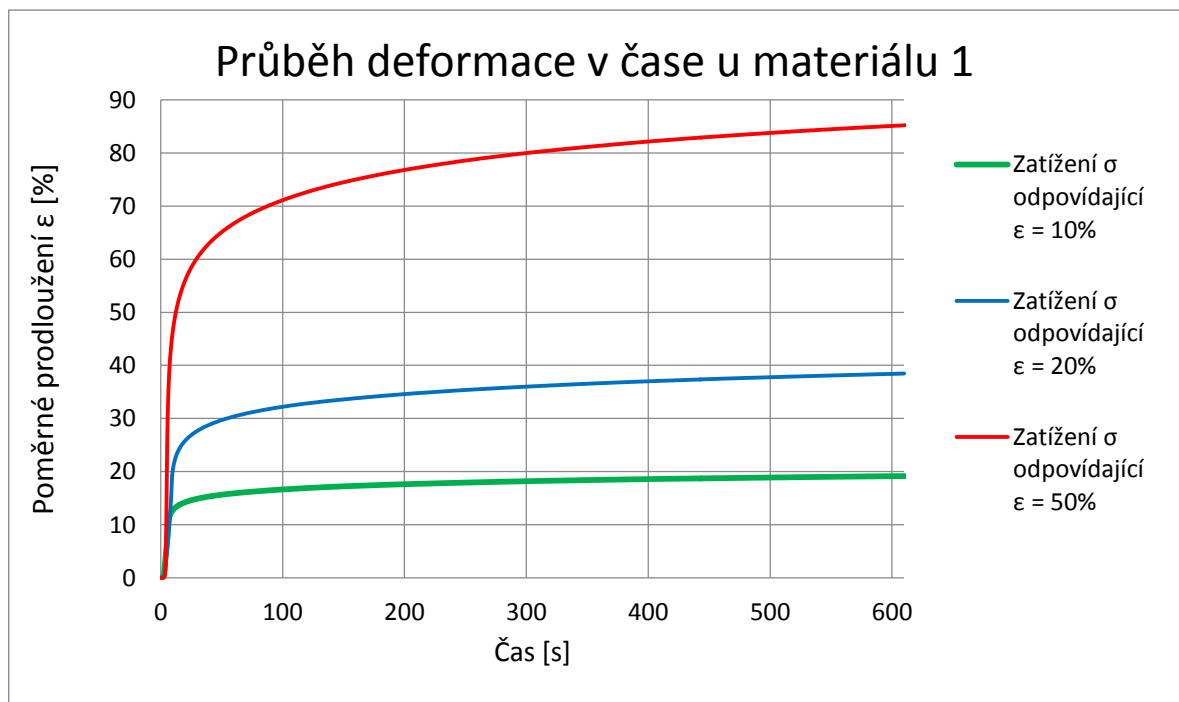


Obr. 38: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 1

6.1.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvousé zatížení

Tab. 4: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvousém zatížení u materiálu 1

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	8,12	24,92
$\epsilon_0 = 20\%$	21,62	15,22
$\epsilon_0 = 50\%$	36,32	3,74



Obr. 39: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvousého zatížení pro materiál 1

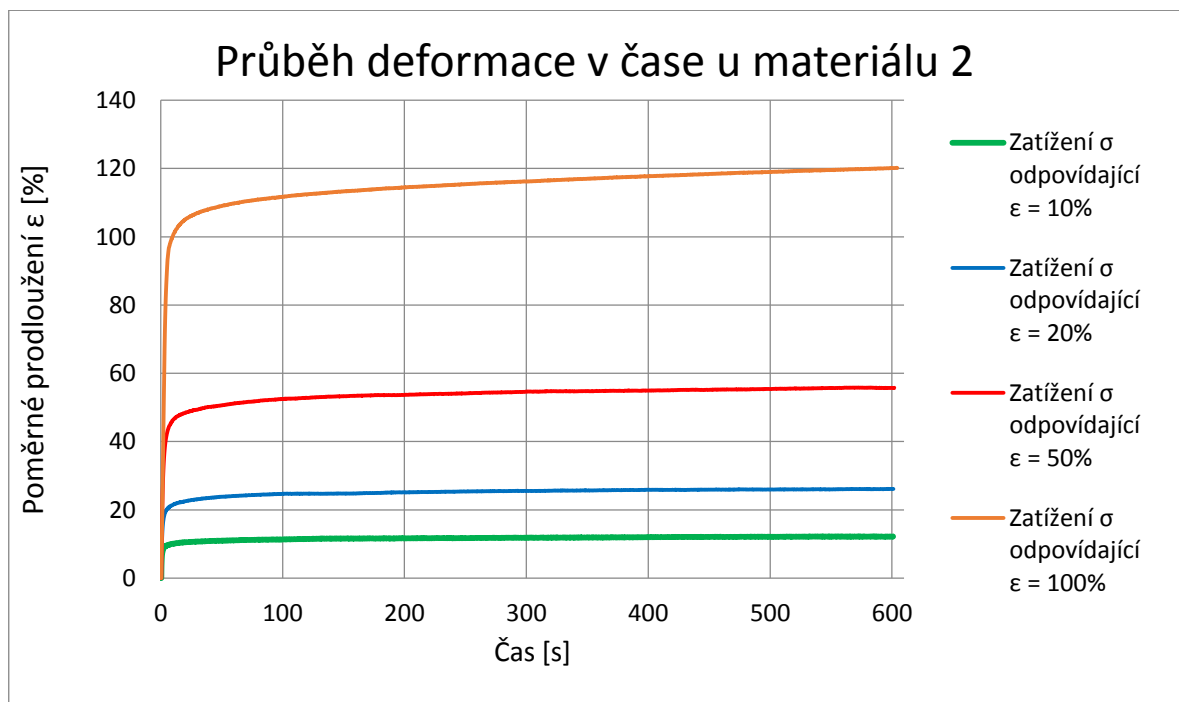
6.2 Materiál 2

Směs označená jako materiál 2 obsahovala kaučuky přírodní (NR) a butadienový (BR). Obsah sazí zde byl 60 dsk (díly na sto dílů kaučuku).

6.2.1 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení

Tab. 5: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 2

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	3,26	15,40
$\epsilon_0 = 20\%$	5,69	4,94
$\epsilon_0 = 50\%$	8,90	12,41
$\epsilon_0 = 100\%$	18,78	21,50

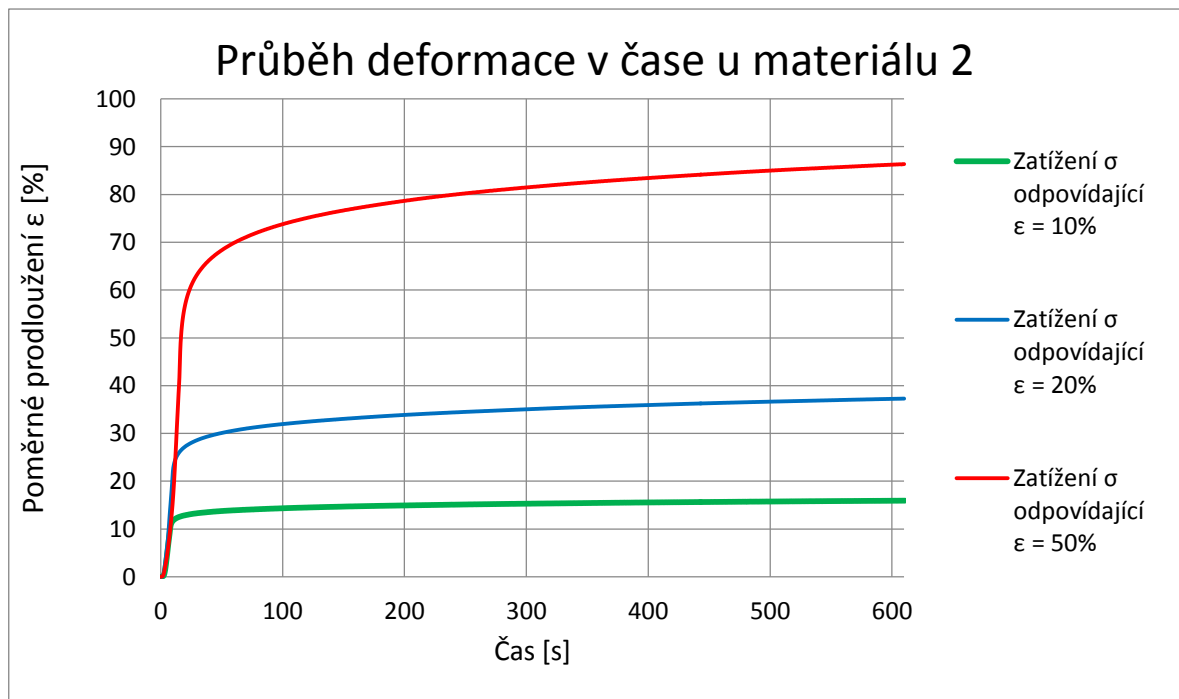


Obr. 40: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 2

6.2.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvousé zatížení

Tab. 6: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvousém zatížení u materiálu 2

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	5,03	7,90
$\epsilon_0 = 20\%$	14,00	15,96
$\epsilon_0 = 50\%$	35,34	11,68



Obr. 41: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvousého zatížení pro materiál 2

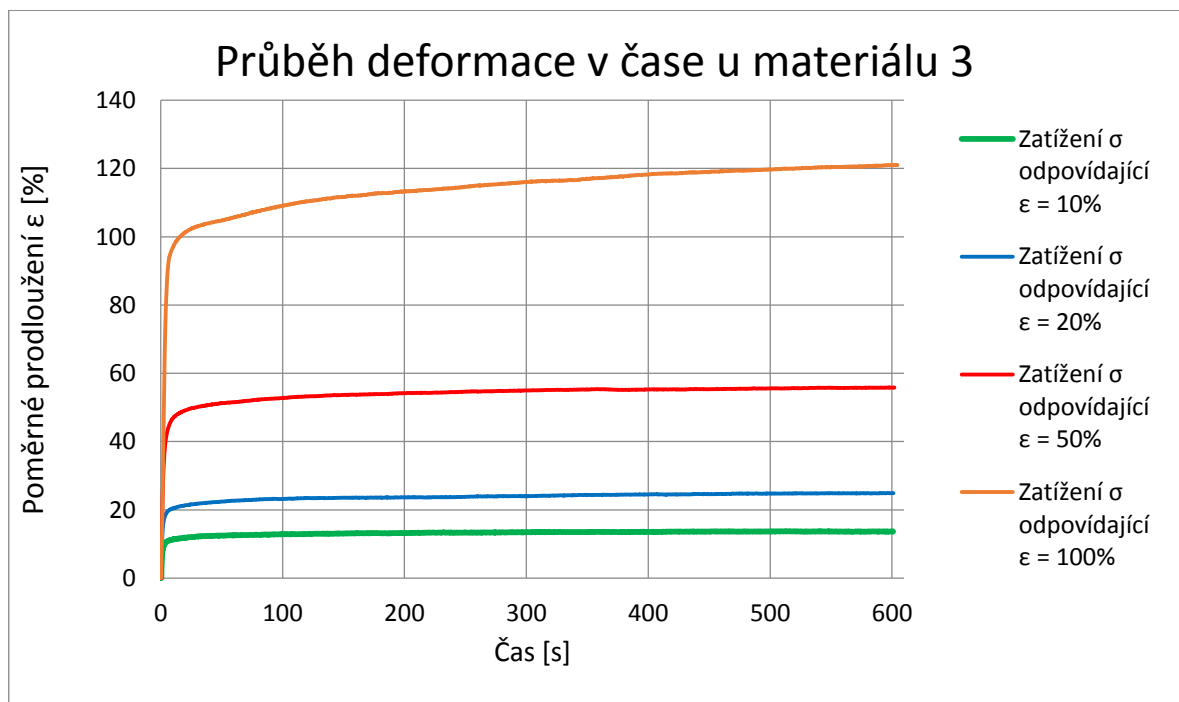
6.3 Materiál 3

Směs označená jako materiál 3 obsahovala kaučuky přírodní (NR), butadienový (BR) a butadien-styrenový (SBR). Obsah sazí zde byl 60 dsk (díly na sto dílů kaučuku).

6.3.1 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení

Tab. 7: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 3

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ε [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\varepsilon_0 = 10\%$	3,28	13,08
$\varepsilon_0 = 20\%$	4,91	10,14
$\varepsilon_0 = 50\%$	8,61	6,51
$\varepsilon_0 = 100\%$	24,80	13,36

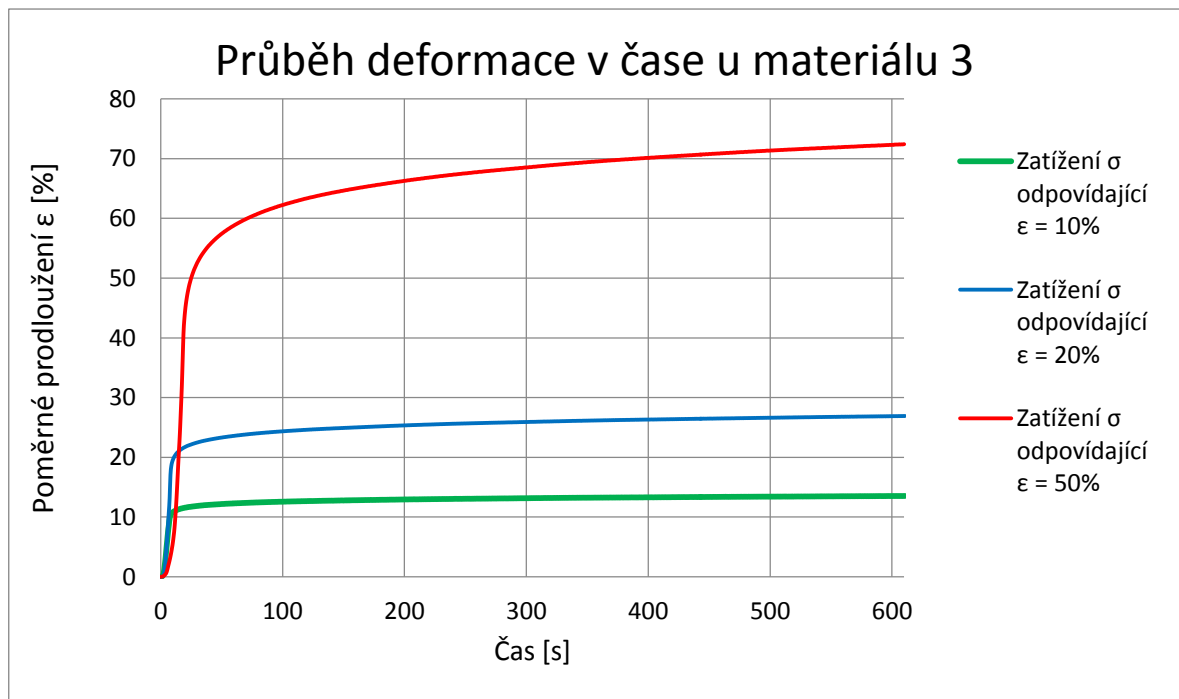


Obr. 42: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 3

6.3.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvousé zatížení

Tab. 8: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvousém zatížení u materiálu 3

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	3,40	19,58
$\epsilon_0 = 20\%$	7,33	16,49
$\epsilon_0 = 50\%$	22,43	8,35



Obr. 43: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvousého zatížení pro materiál 3

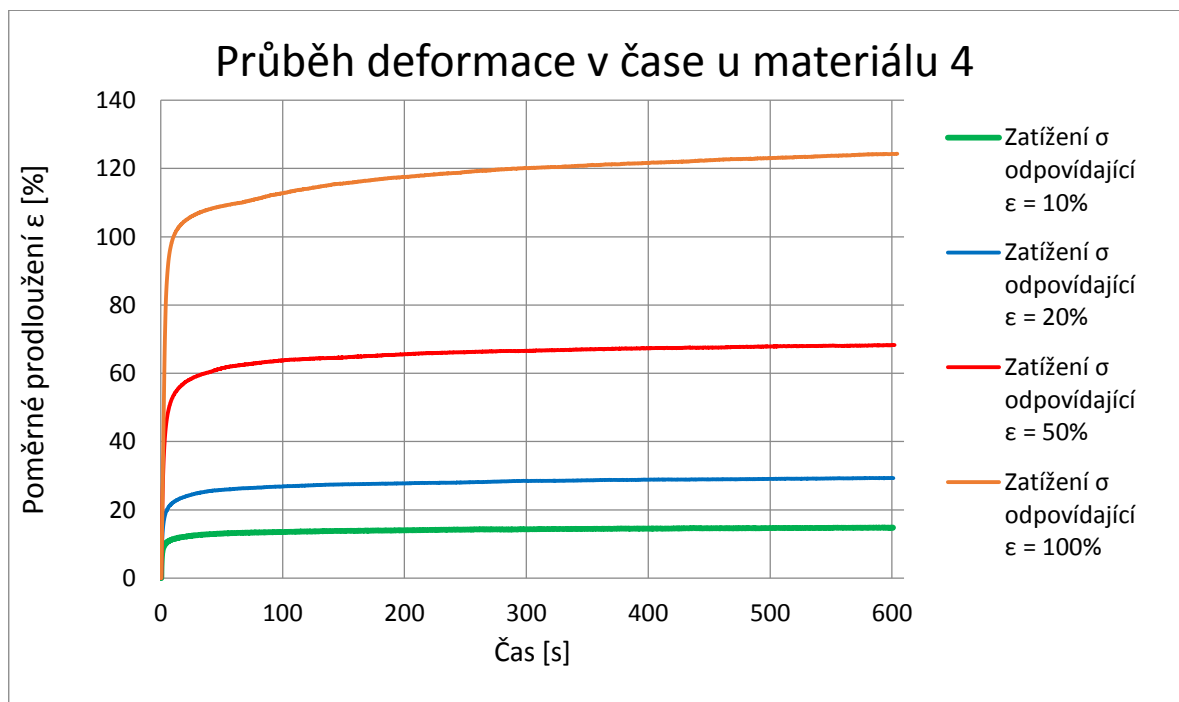
6.4 Materiál 4

Směs označená jako materiál 4 obsahovala kaučuky přírodní (NR), butadienový (BR) a butadien-styrenový (SBR). Obsah sazí zde byl 55 dsk (díly na sto dílů kaučuku).

6.4.1 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení

Tab. 9: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 4

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	5,55	19,66
$\epsilon_0 = 20\%$	9,56	11,87
$\epsilon_0 = 50\%$	12,90	3,81
$\epsilon_0 = 100\%$	23,87	18,67

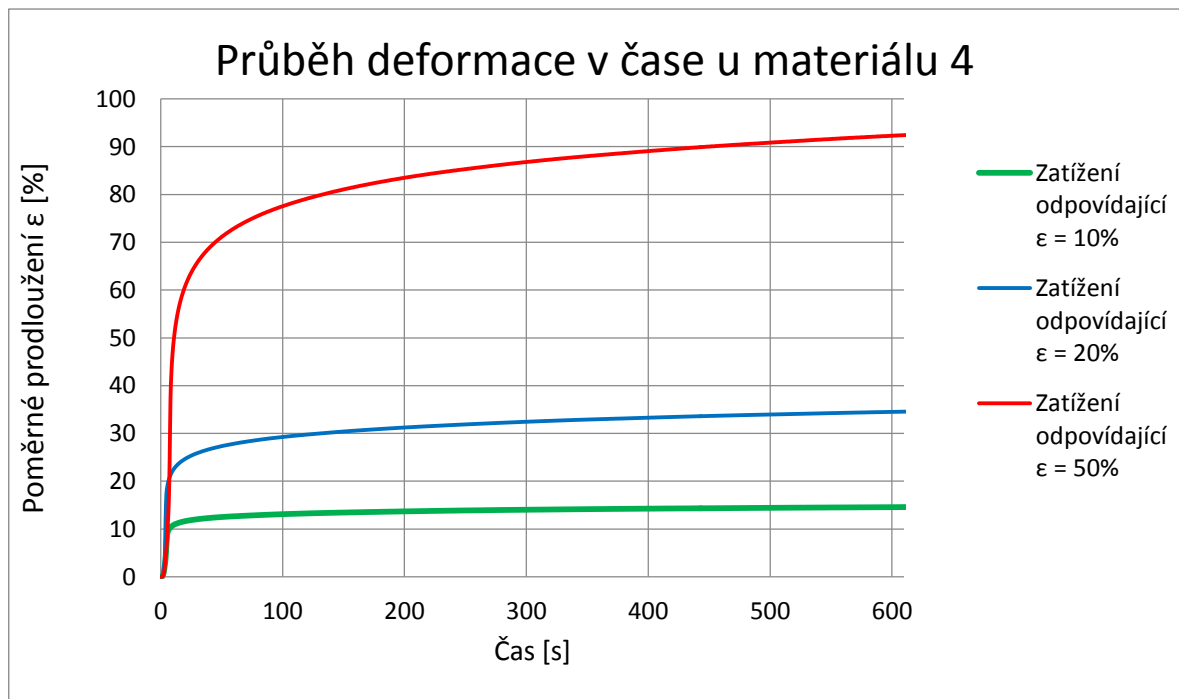


Obr. 44: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 4

6.4.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvousé zatížení

Tab. 10: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvousém zatížení u materiálu 4

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	5,07	8,97
$\epsilon_0 = 20\%$	14,25	11,66
$\epsilon_0 = 50\%$	36,45	7,01



Obr. 45: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvousého zatížení pro materiál 4

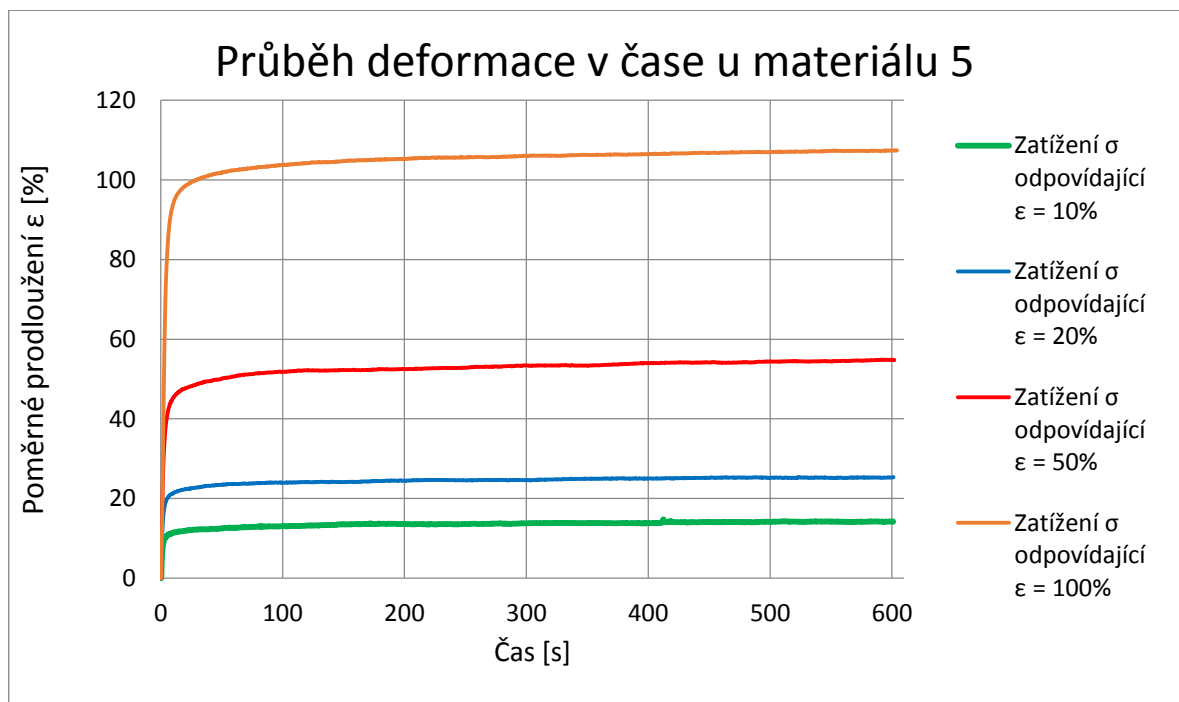
6.5 Materiál 5

Směs označená jako materiál 5 obsahovala kaučuky přírodní (NR), butadienový (BR) a butadien-styrenový (SBR). Obsah sazí zde byl 53 dsk (díly na sto dílů kaučuku).

6.5.1 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení

Tab. 11: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 5

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	3,76	13,81
$\epsilon_0 = 20\%$	4,60	8,40
$\epsilon_0 = 50\%$	9,40	50,66
$\epsilon_0 = 100\%$	12,18	14,01

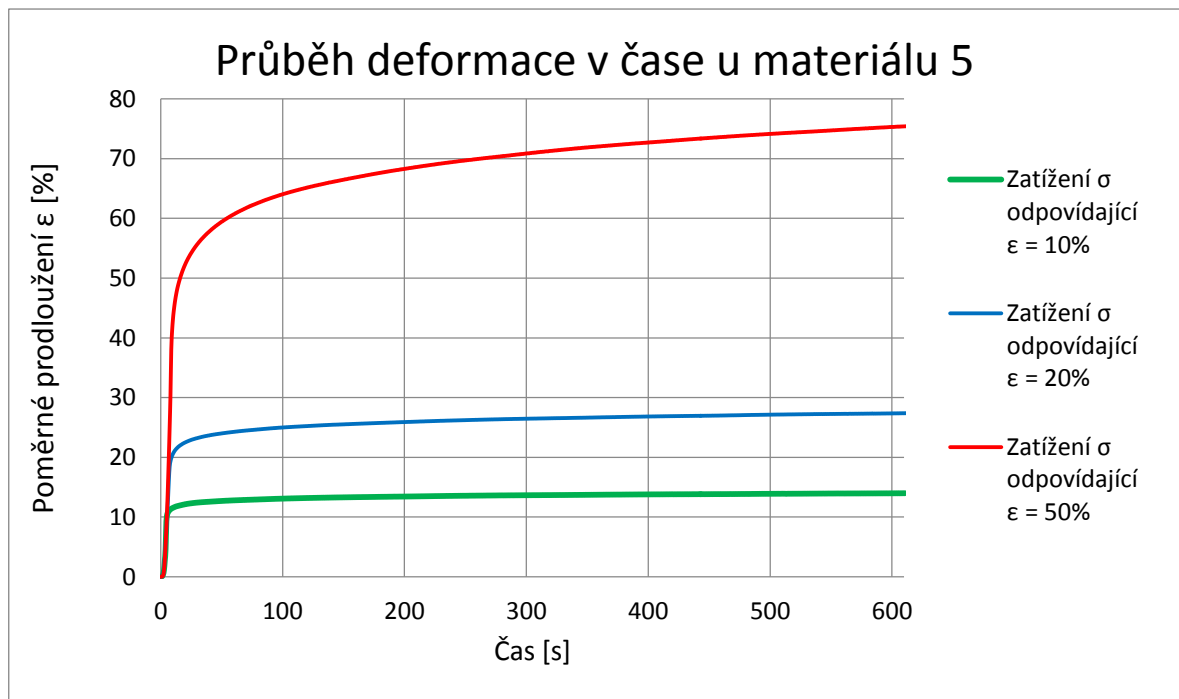


Obr. 46: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 5

6.5.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení

Tab. 12: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení u materiálu 5

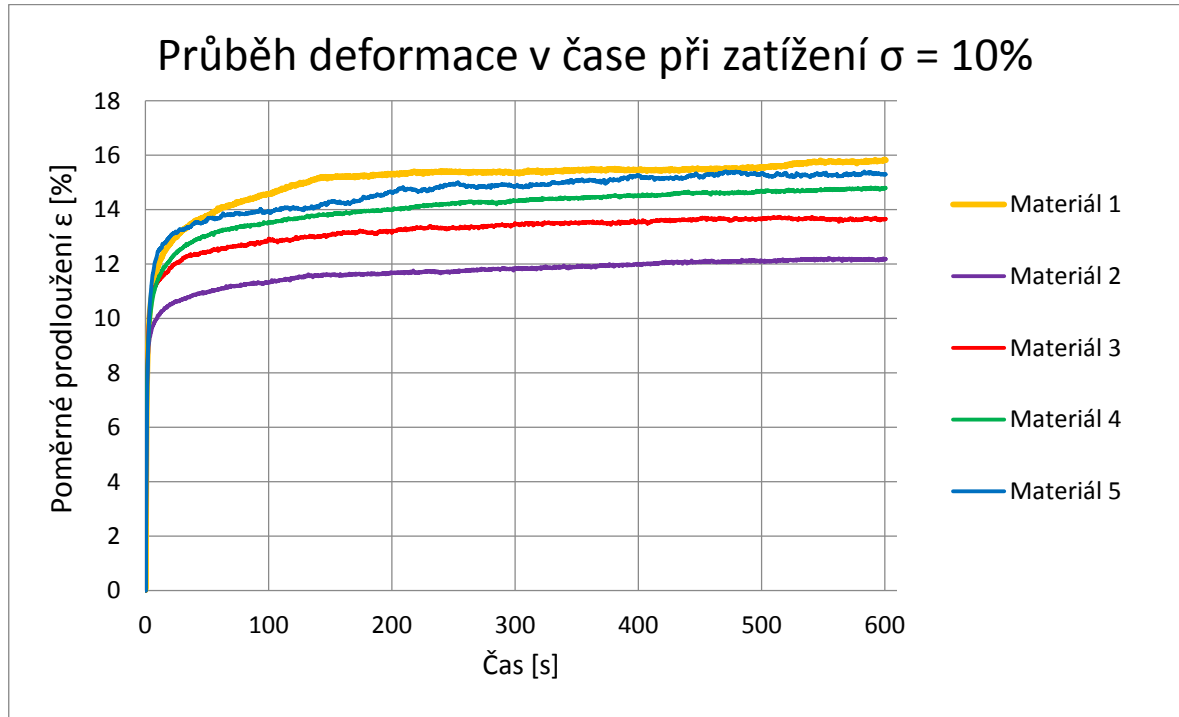
Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]	
	Medián	Variační koeficient
$\epsilon_0 = 10\%$	3,54	5,85
$\epsilon_0 = 20\%$	7,60	8,55
$\epsilon_0 = 50\%$	24,99	8,62



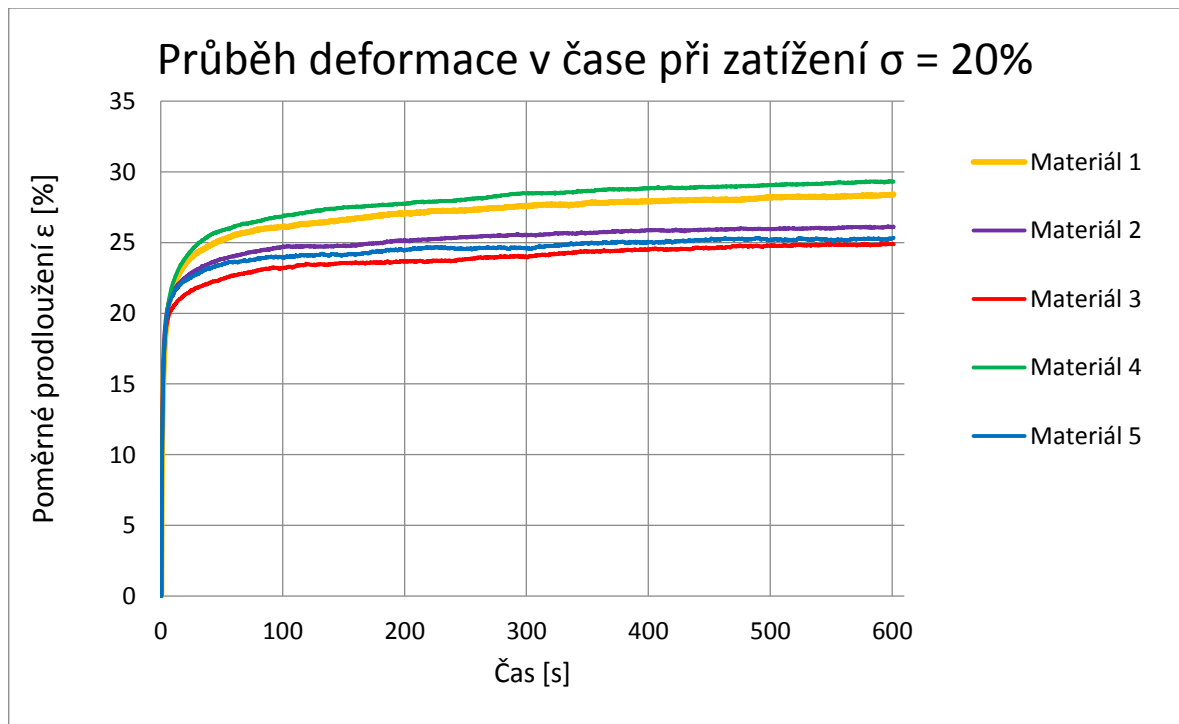
Obr. 47: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení pro materiál 5

6.6 Srovnání průběhů zkoušek u všech testovaných materiálů

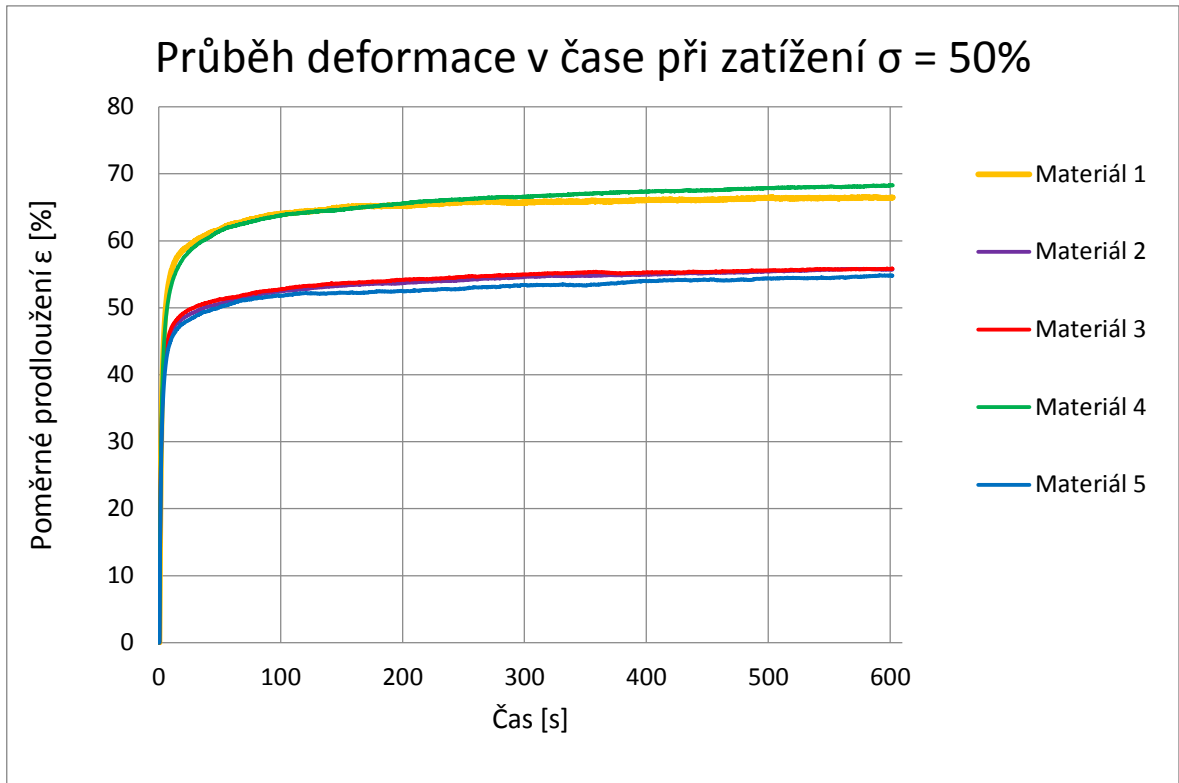
6.6.1 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – jednoosé zatížení



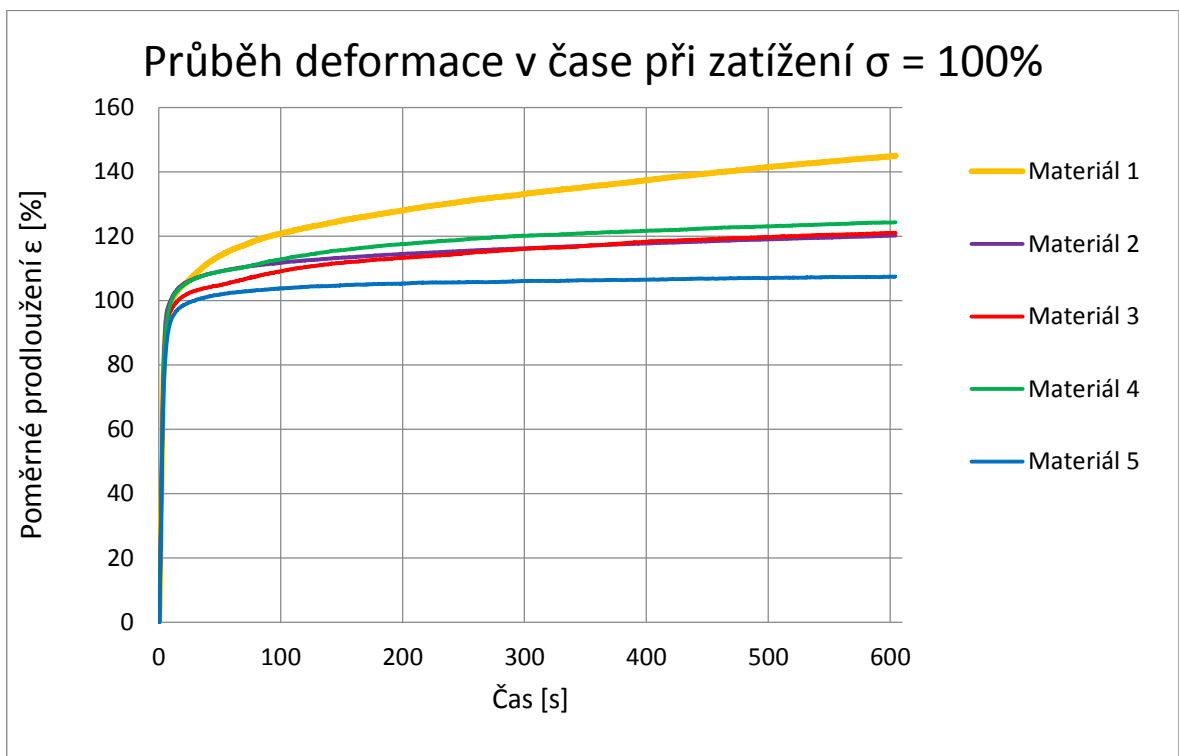
Obr. 48: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 10% pro všechny materiály



Obr. 49: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 20% pro všechny materiály

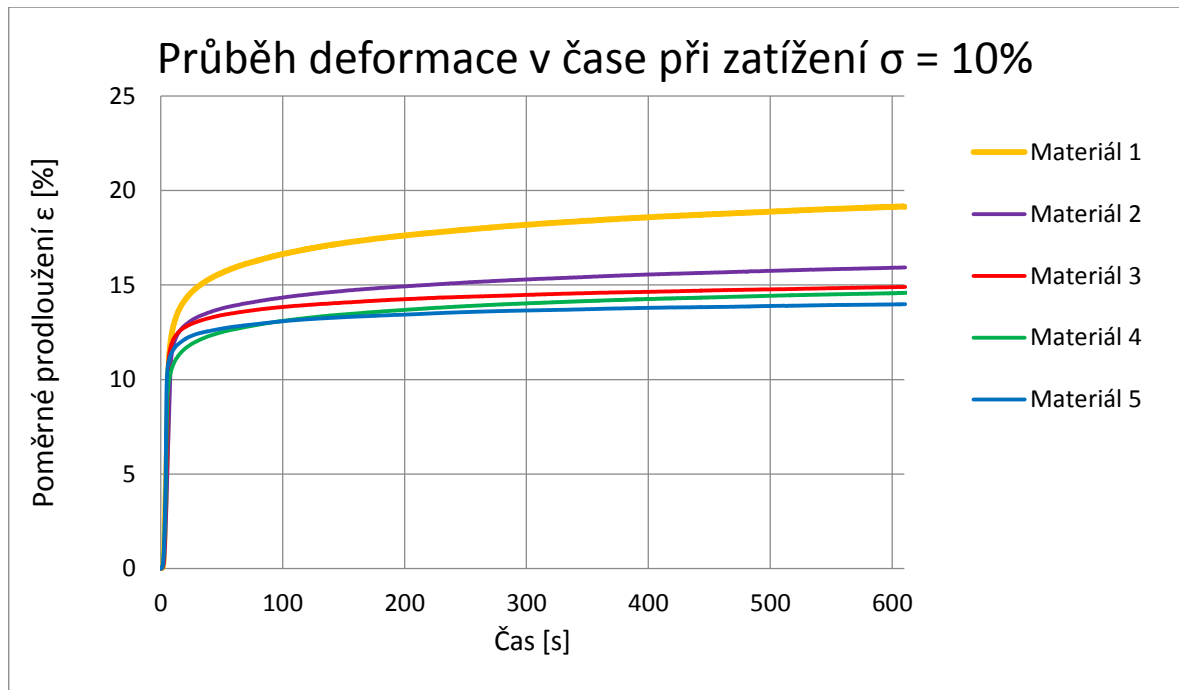


Obr. 50: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 50% pro všechny materiály

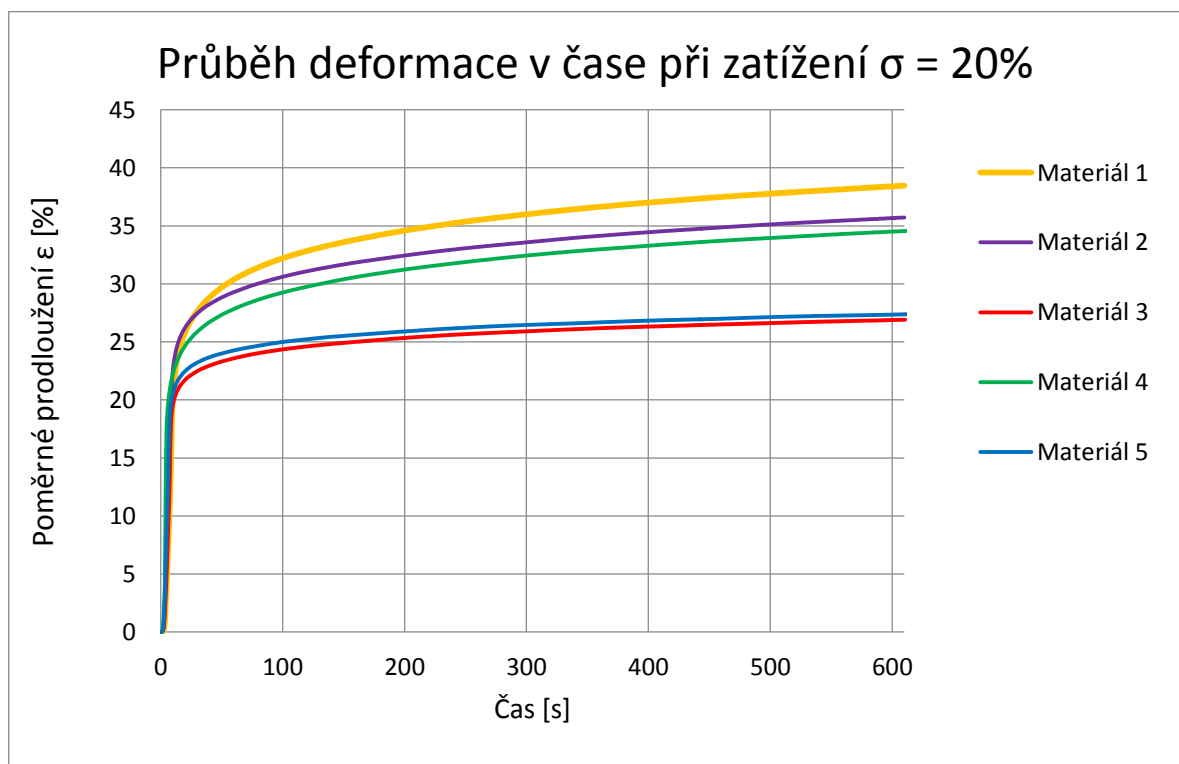


Obr. 51: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 100% pro všechny materiály

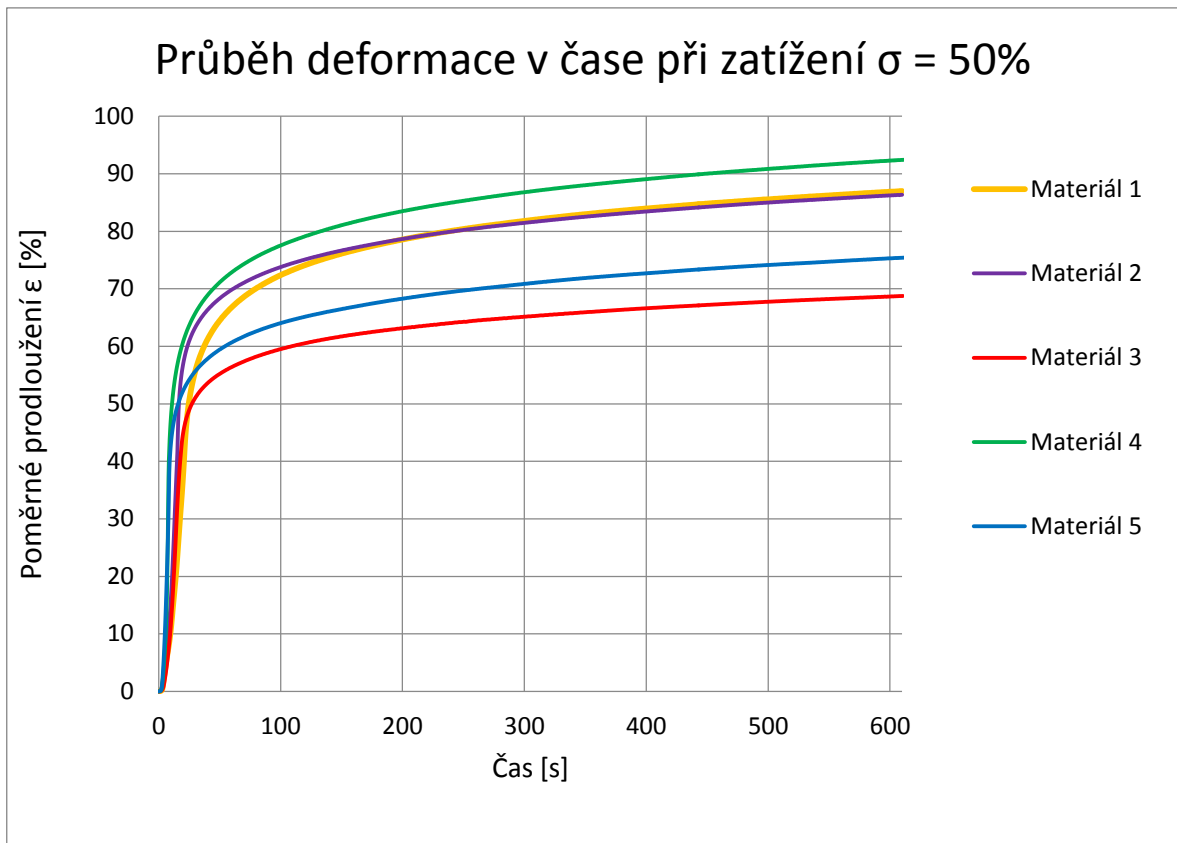
6.6.2 Zkouška tečení materiálu (Creep test) – dvouosé zatížení



Obr. 52: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během dvouosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 10% pro všechny materiály



Obr. 53: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 20% pro všechny materiály



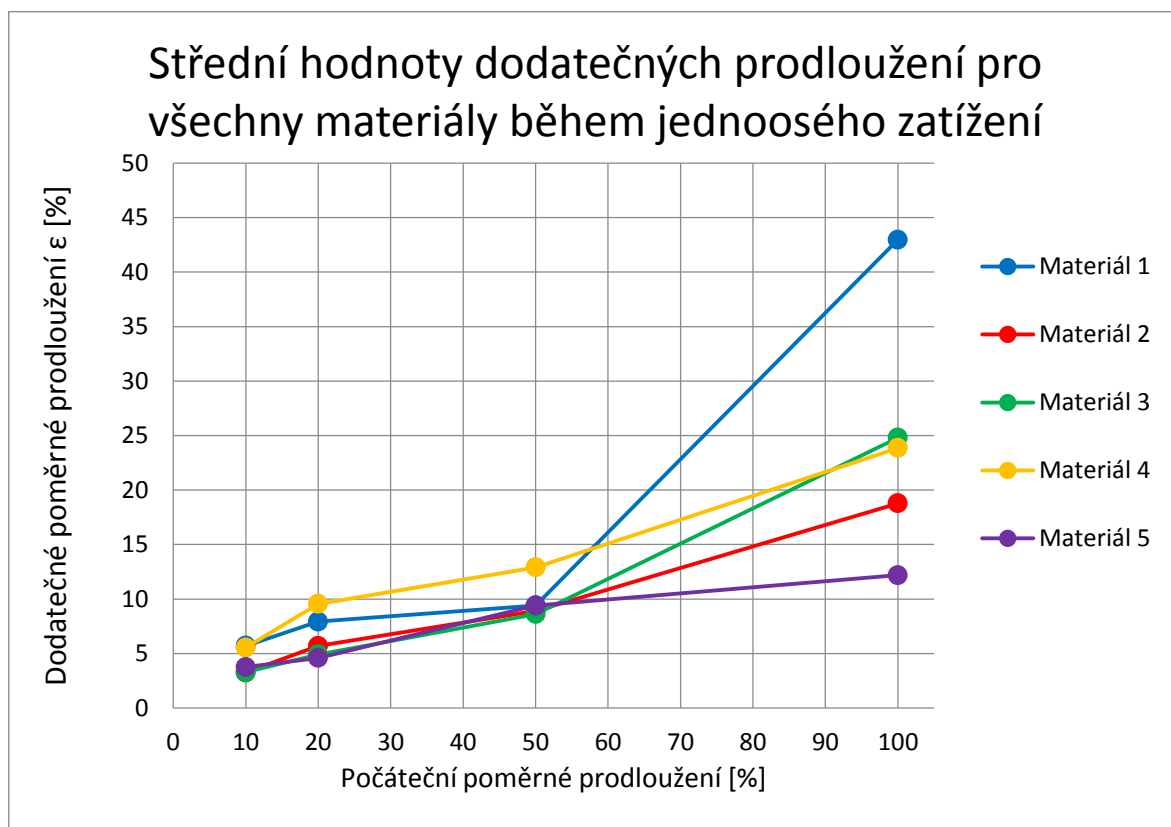
Obr. 54: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 50% pro všechny materiály

6.6.3 Porovnání naměřených hodnot dodatečného poměrného prodloužení u všech materiálů

6.6.3.1 Jednoosé zatížení

Tab. 13: Naměřené střední hodnoty dodatečného poměrného prodloužení u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení odpovídajícím různým počátečním poměrným prodloužením pro všechny zkoušené materiály

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]				
	Materiál 1	Materiál 2	Materiál 3	Materiál 4	Materiál 5
$\epsilon_0 = 10\%$	5,71	3,26	3,28	5,55	3,76
$\epsilon_0 = 20\%$	7,92	5,69	4,91	9,56	4,60
$\epsilon_0 = 50\%$	9,41	8,90	8,61	12,90	9,40
$\epsilon_0 = 100\%$	42,97	18,78	24,80	23,87	12,18

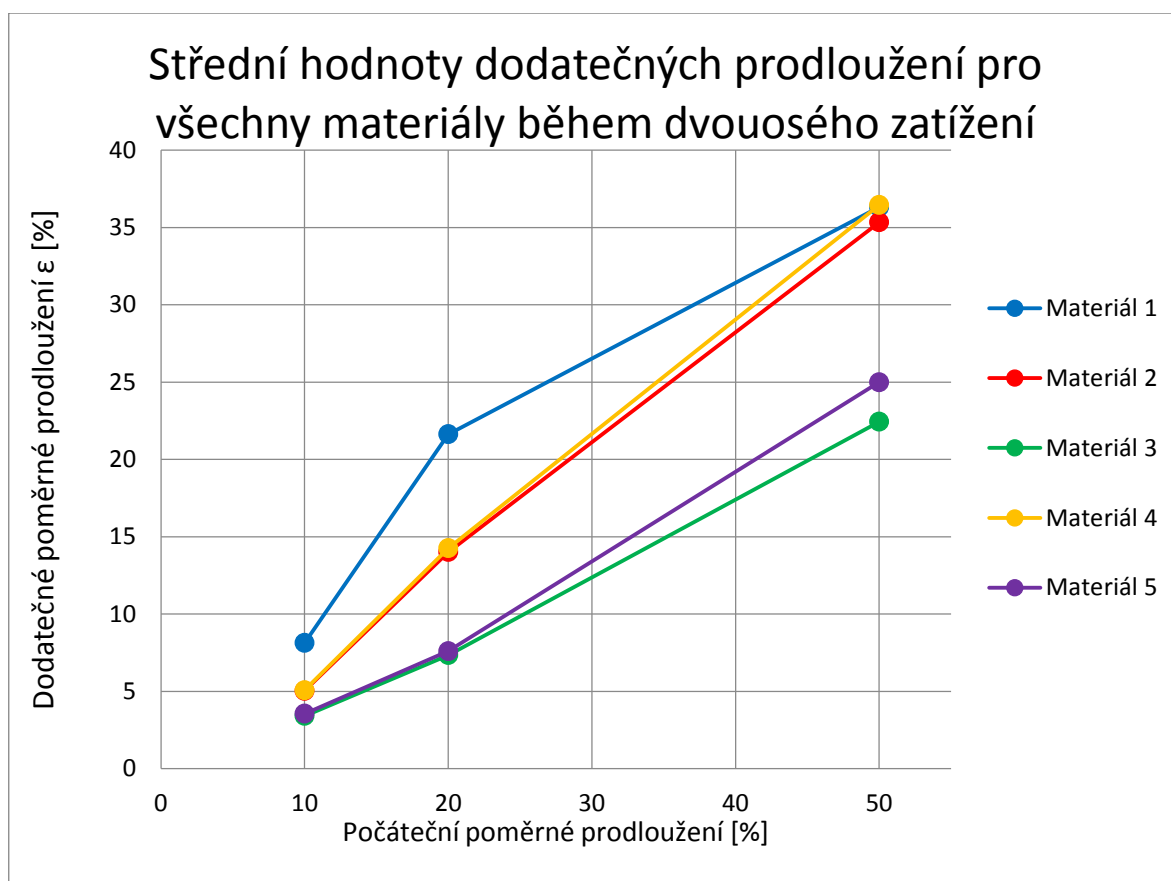


Obr. 55: Srovnání středních hodnot dodatečných prodloužení u zkoušek tečení materiálu během jednoosého zatížení, které odpovídalo danému počátečnímu poměrnému prodloužení, pro všechny testované materiály

6.6.3.2 Dvousé zatížení

Tab. 14: Naměřené střední hodnoty dodatečného poměrného prodloužení u zkoušky tečení materiálu během dvousého zatížení odpovídajícím různým počátečním poměrným prodloužením pro všechny zkoušené materiály

Počáteční poměrné prodloužení	Dodatečné poměrné prodloužení ϵ [%]				
	Materiál 1	Materiál 2	Materiál 3	Materiál 4	Materiál 5
$\epsilon_0 = 10\%$	8,12	5,03	3,40	5,07	3,54
$\epsilon_0 = 20\%$	21,62	14,00	7,33	14,25	7,60
$\epsilon_0 = 50\%$	36,32	35,34	22,43	36,45	24,99



Obr. 56: Srovnání středních hodnot dodatečných prodloužení u zkoušek tečení materiálu během jednoosého zatížení, které odpovídalo danému počátečnímu poměrnému prodloužení, pro všechny testované materiály

7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Charakteristika tečení materiálu je důležitá vlastnost, která může hrát velkou roli během volby materiálu pro konkrétní typ aplikace. Tečením materiálu rozumíme průběh postupné deformace, pokud je materiál dlouhodobě vystaven konstantnímu zatížení.

Tečení materiálu se zkoumalo jak při jednoosé napjatosti, tak také při dvouosé napjatosti při různých velikostech zatížení, na kterých následovala výdrž 10 minut. Ze všech provedených zkoušek je patrné, že při vyšší velikosti zatížení materiál více teče. U dvouosého zatížení také dochází k většímu tečení materiálu, než je tomu u jednoosého zatížení, toto se začíná projevovat hlavně s vyšší hodnotou zatížení.

U zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 10% během jednoosého zatížení vykazoval nejnižší dodatečné poměrné prodloužení materiál 2 s hodnotou 3,26 %, velmi podobně se choval materiál 3, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 3,28%. Následovaly materiály 5 a 4, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 3,76% a 5,55%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 1, kde dosahovalo 5,71%.

U zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 20% během jednoosého zatížení vykazoval nejnižší dodatečné poměrné prodloužení materiál 5 s hodnotou 4,60 %, druhé nejnižší dodatečné poměrné prodloužení zaznamenal materiál 3, kde bylo 4,91%. Následovaly materiály 2 a 1, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 5,69% a 7,92%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 4, kde dosahovalo 9,56%.

U zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 50% během jednoosého zatížení vykazoval nejnižší dodatečné poměrné prodloužení materiál 3 s hodnotou 8,61 %, druhé nejnižší dodatečné poměrné prodloužení zaznamenal materiál 2, kde bylo 8,90%. Následovaly materiály 5 a 1 s téměř stejnou hodnotou dodatečného poměrného prodloužení 9,40% a 9,41%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 4, kde dosahovalo 12,90%.

U zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 100% během jednoosého zatížení vykazoval nejnižší hodnotu dodatečného poměrného prodloužení materiál 5, a to 12,18 %, druhé nejnižší dodatečné poměrné prodloužení zaznamenal materiál 2, kde bylo 18,78%. Následovaly materiály 4 a 3, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 23,87% a

24,80%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 1, kde dosahovalo dokonce 42,97%.

Během dvouosého zatížení, které odpovídalo počátečnímu poměrnému prodloužení 10%, vykazoval nejnižší dodatečné poměrné prodloužení materiál 2 s hodnotou 3,40 %, podobně se choval materiál 5, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 3,54%. Následovaly materiály 2 a 4, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 5,03% a 5,07%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 1, kde dosahovalo 8,12%.

Během dvouosého zatížení, které odpovídalo počátečnímu poměrnému prodloužení 20%, vykazoval nejnižší dodatečné poměrné prodloužení materiál 3 s hodnotou 7,33%, podobně se zde choval materiál 5, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 7,60%. Následovaly materiály 2 a 4, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 14,00% a 14,25%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 1, kde dosahovalo 21,62%.

Během dvouosého zatížení, které odpovídalo počátečnímu poměrnému prodloužení 50%, vykazoval nejnižší dodatečné poměrné prodloužení materiál 3 s hodnotou 22,43 %, druhé nejnižší dodatečné poměrné prodloužení zaznamenal materiál 5, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 24,99%. Následovaly materiály 2 a 1, kde bylo dodatečné poměrné prodloužení 35,34% a 36,32%. Nejvyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení u tohoto typu zatížení nabýval materiál 4, kde dosahovalo 36,45%.

Materiály 1 a 4 dosahovaly téměř u všech typů zatížení velmi vysokých hodnot dodatečného poměrného prodloužení, ze všech zkoušených materiálů se tedy jednalo o materiály, u kterých dochází k největšímu tečení. Materiál 1 pak zaznamenal při jednoosém zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 100% výrazně vyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení, než všechny ostatní zkoušené materiály. Jednalo se téměř o dvounásobek hodnoty dodatečného poměrného prodloužení, než u materiálu s druhou nejvyšší hodnotou a více, než 3,5 násobek hodnoty dodatečného poměrného prodloužení materiálu s nejnižší hodnotou.

Materiál 2 vykazoval nízké hodnoty dodatečného poměrného prodloužení během jednoosého zatížení, během dvouosého zatížení dosahoval průměrných hodnot dodatečného poměrného prodloužení.

Materiál 3 dosahoval nejnižších hodnot u většiny typů zatížení, s výjimkou jednoosého zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 100%, kde docházelo k většímu tečení materiálu.

Materiál 5 vykazoval poměrně nízké hodnoty dodatečného poměrného prodloužení jak při všech typech jednoosého zatížení, tak také u zatížení dvouosých. Tento materiál tedy ze zkoušených materiálů vykazuje nízké tečení při všech provedených typech zatížení.

ZÁVĚR

U všech materiálů byly provedeny zkoušky tečení materiálu s cílem zjištění jejich vlastností v této oblasti. Zkoušky tečení materiálu byly provedeny během jednoosého zatížení, a také během dvouosého zatížení. Výdrž na daném zatížení byla pro každé jednotlivé zkušební tělísko vždy 10 minut, velikost zatížení se lišila podle aktuálně prováděné zkoušky. U jednoosého zatížení se zkoumalo chování během zatížení odpovídajících počátečním poměrným prodloužením 10%, 20%, 50% a 100%. U dvouosého zatížení pak chování během zatížení, která odpovídala počátečnímu poměrnému prodloužení 10%, 20% a 50%. Měření bylo uskutečněno za laboratorních podmínek, při teplotě 20 °C v laboratořích univerzity.

Bylo zjišťováno, k jaké hodnotě dodatečného poměrného prodloužení dojde u jednotlivých materiálů od doby dosažení daného zatížení po moment ukončení zkoušky. Tyto hodnoty byly zaneseny v praktické části práce do přehledných tabulek a grafů.

U všech materiálů lze jednoznačně říci, že s rostoucí hodnotou konstantního zatížení během zkoušky, ať už u jednoosého nebo dvouosého zatížení, dochází k většímu dodatečnému poměrnému prodloužení.

Během zatížení dvouosou napjatostí dochází k výraznějšímu dodatečnému poměrnému prodloužení, než při zatížení jednoosou napjatostí, to se začíná projevovat zejména od zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 20% a více.

U jednoosého zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 10% a 20% dosahovaly vyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení materiály 1 a 4, materiály 2,3 a 5 dosahovaly hodnot nižších. U zatížení odpovídajícímu počátečnímu poměrnému prodloužení 50% vykazoval vyšší hodnoty dodatečného poměrného prodloužení materiál 4, ostatní materiály se při tomto zatížení chovaly téměř stejně. U zatížení, které odpovídalo počátečnímu poměrnému prodloužení 100%, se již hodnoty dodatečných poměrných prodloužení u jednotlivých materiálů velmi lišily, nejvyšších hodnot zde dosahoval materiál 1, nejnižších pak materiál 5.

U dvouosého zatížení 10%, 20% i 50% dosahovaly vyšších hodnot dodatečného poměrného prodloužení materiály 1, 2 a 3, nižších hodnot pak materiály 3 a 5.

Pokud bychom hledali materiál, který nejméně teče i při větších zatíženích, vycházel by nejlépe materiál 5, případně by se ještě dalo uvažovat o materiálu 3.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TREBUŇA, F., HUŇADY, R., FRANKOVSKÝ, P. Metoda digitalnejobrazovej korelacie [online]. KAMaM, Sjf TU Košice. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/434-metoda-digitalnej-obrazovej-korelacie>
- [2] International Digital Image Correlation Society, JONES, E.M.C., IADICOLA, M.A. (Eds.) (2018). A GoodPracticesGuidefor Digital Image Correlation. Dostupné z: doi: 10.32720/idics/gpg.ed1.
- [3] BANKS, J. et al. Assessmentof Digital Image Correlation as a methodofobtaining deformationsof a structureunder fluid load. JournalofFluids and Structures [online]. 2015(58), 173-178 [cit. 2021-12-14]. ISSN 0889-9746. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.08.007>
- [4] MCCORMICK, N., LORD, J., 2010. Digital Image Correlation - Sciencedirect (13) 52-54 [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70235-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70235-2)
- [5] CANTOURNET, S., DESMORAT R., BESSON J., 2009. Mullinseffect and cyclic stress softeningoffilledelastomers by internalsliding and frictionthermodynamics model - Sciencedirect [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.12.025>
- [6] SUTTON, M.A., ORTEAU, J.J., SCHREIER, H. Image CorrelationforShape, Motion and DeformationMeasurements. and DeformationMeasurements. Springer US, 2009, 321 s. ISBN 978-0-387-78746-6.
- [7] REU, P. (2013), Stereo-rig Design: Stereo-AngleSelection – Part 4. ExperimentalTechniques, 37: 1-2. Dostupné z doi: <https://doi.org/10.1111/ext.12006>
- [8] *DIC Standard 3D - Dantec Dynamics | PrecisionMeasurement Systems &Sensors* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/dic-standard-3d/>
- [9] *MicroDIC - Dantec Dynamics | PrecisionMeasurement Systems &Sensors* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/microdic/>
- [10] *DIC High-Speed - Dantec Dynamics | PrecisionMeasurement Systems &Sensors* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/dic-high-speed/>

- [11] GROSS, D. *Mechanics of materials -- formulas and problems*. Berlin, Germany: Springer, ©2017., 1 online resource. Dostupné z: doi:9783662538807
- [12] *Deformace pevného tělesa* [online]. [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/629-deformace-pevneho-telesa>
- [13] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 4., rev. a upr. Praha: Academia, 2011, 878 s. Gerstner. ISBN 9788020020390.
- [14] POLYMER & FILLERS [online]. [cit. 2020-11-27] Dostupné z: <http://polymer-filler.blogspot.com/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.html>
- [15] DUCHÁČEK, V., HRDLIČKA Z., 2009. Gumárenské suroviny a jejich zpracování. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 199 s. ISBN 9788070807132.
- [16] DVOŘÁK, Z., JAVOŘÍK, J., 2009. Elastomerní konstrukční materiály. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 93 s. ISBN 9788002021551.
- [17] Jiří Maláč. Gumárenská technologie 4.Směsi1 Kaučuky[online]. [cit. 2023-01-25] Dostupné z: <https://adoc.pub/jii-mala-gumarenska-technologie-4-smsi-1-obsah.html>
- [18] DUCHÁČEK, V., 2006. Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 158 s. ISBN 8002017846.
- [19] MALÁČ, J., 2005. Gumárenská technologie [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://adoc.pub/gumarenska-technologie.html>
- [20] Natural Rubber | Polymerové typy -Resinex [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/natural-rubber.html>
- [21] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. Verze knihy: 15. [Online]: [CodeCreator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [22] BROWN, R., 2006. Physical Testing of Rubber. 4. Springer US. ISBN 978-0-387-29012-6. Dostupné z: doi:10.1007/0-387-29012-5
- [23] HARISH, A., 2021. How to Choose a Hyperelastic Material Model for Your FEA. In: SIMSCALE [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/2016/06/how-to-choose-hyperelastic-material/>

- [24] DAS GUPTA, Saikat, Rabindra MUKHOPADHYAY, Krishna C. BARANWAL a Anil K. BHOWMICK. *Reverse engineering of rubber products: concepts, tools, and techniques*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2014], xviii, 339 s. ISBN 978-0-8493-7316-9.
- [25] Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US, 2009, 321s. ISBN 978-0-387-78746-6
- [26] The Specimen Optimization for the Equibiaxial Test of Elastomers. The Specimen Optimization for the Equibiaxial Test of Elastomers [online]. Department of Production Engineering, Faculty of Technology, 1-4 [cit. 2023-2-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261844574_The_specimen_optimization_for_the_equibiaxial_test_of_elastomers
- [27] JAVOŘÍK, Jakub a Zdeněk DVOŘÁK. *Equibiaxial test of elastomers: Kautschuk, Gummi, Kunststoffe*. 2007, vol. 60, issue 11, p. 608-610. Dostupné také z: https://publikace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1002704/Fulltext_1002704.pdf?sequence=1&isAllowed=n
- [28] BROWN, R., 2006. *Physical Testing of Rubber*. 4. Springer US. ISBN 978-0-387-29012-6. Dostupné z: doi:10.1007/0-387-29012-5
- [29] WARD, I. M. a J. SWEENEY. *Mechanical properties of solid polymers*. Third edition. Chichester, West Sussex: John Wiley, 2012, 1 online resource. ISBN 9781118413197. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119967125>
- [30] *Creep Testing | Polymer Material Properties Testing | Smithers* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.smithers.com/industries/materials/polymer/physical-testing/material-properties-testing/creep-testing>
- [31] *What is creep and how to deal with it ?* [online]. [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.zemiceurope.com/en/blogs/creep.html>
- [32] *Q400 DIC - Spatially resolved measurement of deformation and strain based on digital image correlation* [online]. [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.limess.com/en/products/q400-digital-image-correlation>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DIC [-]	Digitální korelace obrazu
2D DIC [-]	Dvourozměrná digitální korelace obrazu
3D DVC [-]	Trojrozměrná digitální objemová korelace
AOI [-]	Oblast zájmu
STL [-]	Stereolitografie
CAD [-]	Počítačem podporované projektování
FEM [-]	Metoda konečných prvků
ε [-]	Poměrné prodloužení
ε_p [%]	Tažnost
σ [MPa]	Napětí
E [MPa]	Modul pružnosti v tahu/tlaku
G [MPa]	Modul pružnosti ve smyku
T [K]	Absolutní teplota
α_T [-]	Koeficient teplotní roztažnosti
ν [-]	Poissonovo číslo
NR [-]	Přírodní kaučuk
BR [-]	Butadienový kaučuk
SBR [-]	Butadien-styrenový kaučuk
IR [-]	Isoprenový kaučuk
EPM [-]	Ethylen-propylenový kaučuk
EPDM [-]	Ethylen-propylen-dienový kaučuk
CR [-]	Chloroprenový kaučuk
NBR [-]	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
ACM [-]	Akrylátový kaučuk
OT [-]	Polysulfidový kaučuk

Q [-]	Silikonový kaučuk
FKM [-]	Fluorouhlíkové kaučuky
K [MPa]	Objemový modul pružnosti
W [J/m ³]	Měrná deformační energie
{M} [-]	Množina materiálových konstant
I _i [-]	Deformační invarianty
λ _i [-]	Poměrné protažení
l _i [m]	Deformovaná délka
l ₀ [m]	Původní délka
C _{ij} [-]	Složky pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace
S _{ij} [Pa]	Složky 2. Poola-Kirchhoffova tenzoru napětí
δ _{ij} [-]	Kronekerovo delta
c _{ij} [Pa]	Materiálová konstanta
k [-]	Boltzmannova konstanta
F [N]	Síla
S [m ²]	Plocha
t [m]	Tloušťka
t ₀ [m]	Původní tloušťka
r [m]	Poloměr
p [Pa]	Tlak

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Princip stereo DIC korelace s použitím dvou kamer</i>	13
<i>Obr. 2: Struktura DIC systému – soustava kamer a světel [32]</i>	14
<i>Obr. 3: systém DIC Standard 3D – Q400 od firmy Dantec Dynamics [8]</i>	15
<i>Obr. 4: příslušenství s kalibrační mřížkou [8]</i>	16
<i>Obr. 5: 360 stupňové 3D měření posunů a deformací[8]</i>	16
<i>Obr. 6: zařízení mikro DIC – Q-400 od firmy Dantec Dynamics[9]</i>	17
<i>Obr. 7: nastavení kamer během Hopkinsonového tyčového testu [10]</i>	18
<i>Obr. 8: deformace elementu[11]</i>	20
<i>Obr. 9: deformace při dvouosém napětí[11]</i>	21
<i>Obr. 10: vektor napětí a jeho složky [11]</i>	22
<i>Obr. 11: Element zatíženého tělesa se zaznačenými směry působících napětí[11]</i>	23
<i>Obr. 12: Složky a směry působení u rovinné napjatosti [11]</i>	24
<i>Obr. 13: transformování souřadnic u rovinné napjatosti [11]</i>	24
<i>Obr. 14: směry působení hlavních napětí [11]</i>	25
<i>Obr. 15: zaznačené maximální smykové napětí a složky σ_0 [11]</i>	25
<i>Obr. 16: Závislost napětí na deformaci během zkoušení elastomerů</i>	30
<i>Obr. 17: Průběh křivek závislosti napětí na deformaci při jednotlivých zkouškách [16]</i> ...	34
<i>Obr. 18: Zařízení určené pro zkoušku dvouosé napjatosti v případě nafukování zkušebního tělíska [26]</i>	36
<i>Obr. 19: Nafukování zkušebního tělíska u zkoušky dvouosé napjatosti [27]</i>	36
<i>Obr. 20: Příklad grafu závislosti napětí na deformaci během zkoušky tečení materiálu</i>	40
<i>Obr. 21: Tvar a rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku tečení materiálu s jednoosým zatížením</i>	41
<i>Obr. 22: Použitý vysekávací nůž splňující normu ČSN ISO 37</i>	41
<i>Obr. 23: Použitý strojní lis pro výrobu zkušebních tělísek</i>	41
<i>Obr. 24: Upnuté zkušební tělíska v trhacím stroji ZWICK v nezatíženém stavu</i>	42
<i>Obr. 25: Zkušební tělíska v zatíženém stavu během zkoušky tečení materiálu</i>	42
<i>Obr. 26: Prostředí programu testXpert II</i>	43
<i>Obr. 27: Nastavení parametrů zkušebního tělíska</i>	43
<i>Obr. 28: Nastavení průběhu zkoušky tečení materiálu</i>	43
<i>Obr. 29: Příklad grafu závislosti napětí vůči deformaci během zkoušky tečení materiálu, zaznamenaný průběh pro různá zatížení ve stejném grafu</i>	46
<i>Obr. 30: Tvar a rozměry zkušebního tělíska určeného pro zkoušku tečení materiálu při dvouosém zatížení</i>	47

<i>Obr. 31: Použitý vysekávací nůž pro výrobu zkušebních tělísek určených pro zkoušku tečení materiálu během dvouosého zatížení.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 32: Zkušební zařízení pro uskutečnění zkoušky tečení během dvouosého zatížení</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 33: Upnuté zkušební tělísko opatřené skvrnitým vzorem na střed, fialové křížky znázorňují body, mezi kterými se vyhodnocuje protažení. Zelené čtverečky znázorňují tzv. fazety.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 34: Prostředí programu Mercury RT během nastavení správného osvětlení, nahoře pohled jedné kamery, pod ní pak pohled z druhé kamery. Červená barva značí místa s vysokou mírou osvětlení, modrá pak místa s malým osvětlením. V pravém dolním rohu můžeme vidět nastavení velikosti fazet, v tomto případě 50x50 px.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 35: Pohled na upevněný vzorek ve zkušebním zařízení z poza kamer.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36: ovládání stlačeného vzduchu k nastavení požadované hodnoty tlaku a zatížení ..</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 37: Prostředí programu Mercury RT během zkoušky tečení materiálu s dvouosým zatížením (vlevo vidíme obraz z kamer, na pravé straně pak průběh zkoušky).</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 38: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 1</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 39: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení pro materiál 1</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 40: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 2</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 41: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení pro materiál 2</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 42: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 3</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 43: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení pro materiál 3</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 44: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 4</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 45: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení pro materiál 4</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 46: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení pro materiál 5</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 47: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení pro materiál 5</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 48: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 10% pro všechny materiály</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 49: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 20% pro všechny materiály</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 50: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 50% pro všechny materiály</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 51: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 100% pro všechny materiály</i>	<i>65</i>

- Obr. 52: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během dvouosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 10% pro všechny materiály 66*
- Obr. 53: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 20% pro všechny materiály 66*
- Obr. 54: Graf závislosti poměrného prodloužení na čase během jednoosého zatížení silou odpovídající počátečnímu poměrnému prodloužení 50% pro všechny materiály 67*
- Obr. 55: Srovnání středních hodnot dodatečných prodloužení u zkoušek tečení materiálu během jednoosého zatížení, které odpovídalo danému počátečnímu poměrnému prodloužení, pro všechny testované materiály 68*
- Obr. 56: Srovnání středních hodnot dodatečných prodloužení u zkoušek tečení materiálu během jednoosého zatížení, které odpovídalo danému počátečnímu poměrnému prodloužení, pro všechny testované materiály 69*

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Naměřené hodnoty napětí během standardní tahové zkoušky pro jednotlivé materiály</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 2: Zkorigované hodnoty napětí použité pro zkoušky tečení materiálu</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 3: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 1</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 4: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení u materiálu 1</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 5: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 2</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení u materiálu 2</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 3</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 8: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení u materiálu 3</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 9: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 4</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 10: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení u materiálu 4</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 11: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při jednoosém zatížení u materiálu 5</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 12: Zjištěné hodnoty dodatečného poměrného prodloužení při výdrži 10 minut na daném zatížení během zkoušky tečení materiálu při dvouosém zatížení u materiálu 5</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 13: Naměřené střední hodnoty dodatečného poměrného prodloužení u zkoušky tečení materiálu během jednoosého zatížení odpovídajícím různým počátečním poměrným prodloužením pro všechny zkoušené materiály</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 14: Naměřené střední hodnoty dodatečného poměrného prodloužení u zkoušky tečení materiálu během dvouosého zatížení odpovídajícím různým počátečním poměrným prodloužením pro všechny zkoušené materiály</i>	<i>69</i>