

# Numerický model pryžového uložení stabilizátoru automobilu

Bc. David Šesták

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David ŠESTÁK**

Osobní číslo: **T12684**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Numerický model pryžového uložení stabilizátoru automobilu**

Zásady pro vypracování:

- Literární přehled
- Definice FEM modelu stabilizátoru
- Výpočet
- Analýza výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

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

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 12.5.2014



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je sestavení numerického modelu pryžového uložení stabilizátoru automobilu pro jednotlivé typy zatížení a jejich porovnání s experimentálními testy.

Teoretická část popisuje základní vlastnosti elastomerů, respektive kaučukové směsi. Dále popisuje problematiku spojování pryže s kovem, hyperelastické modely pro výpočty FEA a experimentální zkoušky pro zjištění materiálových konstant. V této části jsou rovněž popsány základní typy stabilizátorů automobilů.

V praktické části jsou popsány programy využití při analýze, 3D a 2D numerické analýza radiálního, axiálního a torzního zatížení pryžového uložení stabilizátoru. Na závěr jsou numerické analýzy porovnávány s reálnými testy uložení.

Klíčová slova: Elastomer, stabilizátor, hyperelastická, analýza,

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to build a numerical model of a car stabilizer rubber mounting for individual types of loading and their comparison to the experimental tests.

The theoretical part of the thesis describes the basic attributes of elastomers, or more precisely, of a rubber mixture. It also describes the issues of a rubber to metal bonding, hyperelastic models for FEA calculation and experimental tests for the material constants determination. The basic types of car stabilizers are also described in this part.

The practical part of the thesis describes the applications used in the analysis, 3D and 2D numerical analysis of the radial, axial and torsional loading of a stabilizer rubber mounting. In conclusion, the numerical analyses are compared with the physical tests of a mounting.

keywords: elastomer, stabilizer, hyperelasticity, analysis

Rád bych tímto způsobem velice poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc.Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D. za významnou pomoc, kterou mi poskytl při vytváření a psaní této diplomové práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ELASTOMERY</b> .....	<b>13</b>
1.1 POLYMERY .....	13
1.2 ELASTOMERY .....	13
1.3 VŠEOBECNÉ VLASTNOSTI ELASTOMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	14
<b>2 KAUKUKOVÉ SMĚSI</b> .....	<b>17</b>
2.1 KAUKUKY .....	17
2.1.1 Přírodní kaučuk (NR) (natural rubber).....	17
2.1.2 Syntetické kaučuky .....	17
2.2 SKLADBA KAUKUKOVÉ SMĚSI .....	19
2.3 PŘÍSADY KAUKUKOVÝCH SMĚSÍ .....	20
2.3.1 Plniva.....	20
2.3.2 Saze .....	20
2.3.3 Minerální plniva .....	20
2.3.4 Vulkanizační činidla.....	21
2.3.5 Urychlovače vulkanizace .....	21
2.3.6 Retardéry vulkanizace .....	21
2.3.7 Změkčovadla .....	22
2.3.8 Antioxidanty, antiozonanty .....	22
2.3.9 Pigmenty .....	23
2.3.10 Nadouvadla .....	23
2.4 VULKANIZACE.....	23
<b>3 POJENÍ PRYŽE S KOVEM</b> .....	<b>26</b>
3.1 PRYŽKOVÉ VÝROBKY .....	26
3.2 POŽADAVKY NA SPOJ PRYŽ – KOV .....	26
3.3 TYPY SPOJŮ .....	26
3.3.1 Spoje dle typu vazby .....	26
3.4 STRUKTURA VULKANIZAČNÍHO SPOJE .....	27
3.5 ZÁLISKY.....	28
<b>4 HYPERELASTICITA</b> .....	<b>30</b>
4.1 HYPERELASTICKÉ MATERIÁLOVÉ MODEL Y.....	31
4.2 PŘEHLED HYPERELASTICKÝCH MODELŮ FEM SYSTÉMŮ .....	33
4.3 STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH KONSTANT PRO HYPERELASTICKÉ MODEL Y .....	37
4.3.1 Zkouška jednoosým tahem.....	38
4.3.2 Zkouška dvouosým tahem.....	39
4.3.3 Zkouška čistým smykem.....	42
<b>5 STABILIZÁTOR AUTOMOBILU</b> .....	<b>43</b>
5.1 FUNKCE STABILIZÁTORU .....	43
5.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ STABILIZÁTORU .....	43
5.2.1 U-stabilizátor.....	43
5.2.2 Torzní příčka .....	44



5.2.3	Hydropneumatické odpružení .....	45
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ .....</b>	<b>47</b>
6.1	POPIS PRYŽOVÉHO ULOŽENÍ STABILIZÁTORU AUTOMOBILU .....	47
6.2	ZATÍŽENÍ .....	48
6.3	PODKLADY PRO ANALÝZU .....	48
<b>7</b>	<b>FEM ANALÝZY, SYSTÉMY A SOFTWAREOVÁ PODPORA .....</b>	<b>49</b>
7.1	FEM .....	49
7.2	SOFTWAREOVÁ PODPORA .....	50
7.2.1	MSC.Patran .....	50
7.2.2	MSC.Marc .....	51
<b>8</b>	<b>MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA .....</b>	<b>52</b>
8.1	POUZDRO (51A6028) .....	52
8.1.1	Zkouška jednoosým tahem – naměřená data .....	52
8.1.2	Zkouška dvouosým tahem – naměřená data .....	53
8.1.3	Zkouška čistým smykem – naměřená data .....	54
8.1.4	Stanovení materiálových konstant .....	55
8.2	JÁDRO POUZDRA (EN AW-ALMG3-H46) .....	56
<b>9</b>	<b>ANALÝZA .....</b>	<b>57</b>
9.1	3D ANALÝZY .....	57
9.1.1	Radiální zatížení .....	59
9.1.1.1	Geometrie modelu .....	59
9.1.1.2	Zatížení a okrajové podmínky .....	59
První krok:	.....	59
Druhý krok:	.....	60
9.1.1.3	Výsledky .....	61
9.1.1.4	Statistika analýzy .....	64
9.1.2	Axiální zatížení .....	64
9.1.2.1	Geometrie modelu .....	64
9.1.2.2	Zatížení a okrajové podmínky .....	65
9.1.2.3	Výsledky .....	66
9.1.2.4	Statistika analýzy .....	69
9.1.3	Torzni zatížení .....	69
9.1.3.1	Geometrie modelu .....	69
9.1.3.2	Zatížení a okrajové podmínky .....	70
9.1.3.3	Výsledky .....	71
9.1.3.4	Statistika analýzy .....	73
9.2	2D ANALÝZY .....	73
9.2.1	Axiální zatížení .....	74
9.2.1.1	Geometrie modelu .....	74
9.2.1.2	Materiálové vlastnosti .....	74
9.2.1.3	Zatížení a okrajové podmínky .....	75
9.2.1.4	Výsledky .....	75
9.2.1.5	Statistika analýzy .....	79
9.2.2	Radiální zatížení .....	79
9.2.2.1	Geometrie modelu .....	79

9.2.2.2	Materiálové vlastnosti .....	80
9.2.2.3	Zatížení a okrajové podmínky .....	80
9.2.2.4	Výsledky .....	81
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>83</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	.....	<b>84</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	.....	<b>86</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	.....	<b>89</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	.....	<b>91</b>

## ÚVOD

Elastomery patří do skupiny polymerů a jsou významným konstrukčním materiálem, se kterým je možné se setkat snad v každém výrobním oboru, stroji, přístroji či zařízení. [1]

Vlastnosti konstrukčních elastomerů se v mnoha směrech liší od ostatních konstrukčních materiálů. Jsou to zejména vysoká elasticita (hyperelasticita), schopnost snášet opakovaně značnou deformaci při dlouhé životnosti, schopnost tlumení (přeměňovat energii mechanickou na tepelnou), chemická stabilita v řadě prostředí, elektrické vlastnosti, nepropustnosti pro tekutiny a další. [2]

S rozvojem elastomerů rostla a rozvíjela se i teoretická oblast. Ta byla zaměřena na poznání chemické části elastomerů a gumárenských surovin, rozvoj technologie zpracování elastomerů a do značné hloubky i oblast metodiky návrhu konstrukce a matematických přístupů k řešení elastomerních prvků. Tento rozvoj vedl k využití metody konečných prvků při použití výpočetní techniky. [1]

Možnost simulovat použití výrobku nebo technického zařízení a také prověřit jeho chování za různých podmínek bez nutnosti pořizovat fyzický model značně urychluje a zlevňuje výzkum a vývoj. Metoda se používá pro řešení problémů pružnosti a dynamiky, ale i k řešení proudění kapalin a plynů, vedení tepla, záření, elektromagnetismus, akustiku, mechaniku hornin a další. [3]

Teoretická část popisuje základní vlastnosti elastomerů, konkrétně kaučukové směsi. Popisuje problematiku hyperelastických modelů pro výpočty FEA a experimentální zkoušky pro zjištění materiálových konstant. Také se věnuje problematice spojování pryže s kovem a popisuje základní typy stabilizátorů automobilů.

Cílem praktické části je numerická analýza zatížení pryžového uložení stabilizátoru automobilu pomocí plošného i prostorového modelu. Simulace jednotlivých metod je řešena softwarově, pomocí metody konečných prvků (FEM). Získané výsledky se vyhodnocovaly a porovnávaly s naměřenými experimentálními daty.

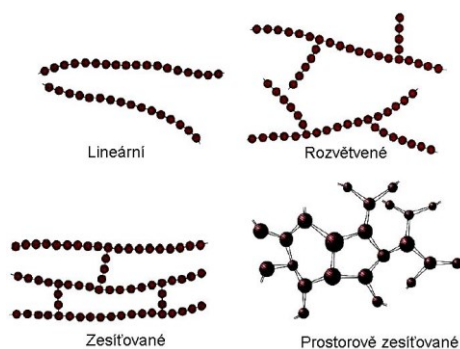
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ELASTOMERY

### 1.1 Polymery

Polymery jsou látky tvořené makromolekulami s převážným obsahem prvků uhlíku C, kyslíku O, vodíku H, dusíku N, chloru Cl a jiných chemických prvků. Jejich použití je ve většině případů z hlediska fyziky ve stavu pevném a tuhém, pastovitém, ve zvláštních případech i ve stavu tekutém (např. součásti mazacích tekutin a pod.) Technologie zpracování polymerů obvykle prochází kapalným, nebo pastovitým stavem, kdy budoucímu výrobku určuje tvar zejména technologické zařízení a to většinou za zpracovatelské teploty a tlaku, někdy i v průběhu časového intervalu. [2]

Polymery jsou děleny do dvou skupin. První je skupina elastomerů a druhá je skupina plastů. Plasty jsou dále děleny na termoplasty a reaktoplasty. [2]



Obr. 1 Struktura polymerů [4]

### 1.2 Elastomery

Elastomery lze obecně považovat za vysoce kondenzované plyny, protože většina dílčích monomerů se vyskytuje v plynném skupenství. Polymerizací vznikají řetězce dlouhých molekul. Jejich molekulová struktura může být amorfní, semikrystalická anebo krystalická. Kaučuky jsou typické amorfní polymery s náhodným uspořádáním molekul. [2]

Krystalické polymery jsou tvrdé a křehké. Semikrystalické polymery vykazují pružné deformace, tok (creep) i plastické deformace. [2]

Elastomer (pryž) je výjimečný svou velkou pružnou deformací. V inženýrské praxi je smykový modul elastomerů definován jako  $G = nkT$ , kde  $n$  je počet řetězců elastomeru v jednotkovém objemu,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota ve stupních Kelvina. Mnoho elastomerních materiálů má při stejné teplotě (nad bodem skelného přechodu) po-

dobné hodnoty smykového modulu  $G$  nebo tvrdosti. Teplota a některé další parametry mají výrazný vliv na jejich vlastnosti. [2]

Elastomerní materiály patří do hlavní skupiny polymerů, které dále rozdělujeme do podskupina přírodní a syntetické materiály. [2]

### 1.3 Všeobecné vlastnosti elastomerních materiálů

Vlastnosti, které charakterizují materiál, je možné rozdělit z hlediska jejich využití pro konstrukční prvky do dvou základních skupin. První skupinou jsou vlastnosti fyzikální (mechanická odolnost) a druhou skupinou vlastnosti chemické (chemická odolnost). Tyto vlastnosti se mohou dále měnit na základě působení zejména způsobu jejich výroby, teploty, času atd. [2]

Fyzikální vlastnosti konstrukčních materiálů v praxi charakterizují zejména vlastnosti jako je pružnost, plasticita, pevnost, tvrdost a houževnatost. Fyzikálních vlastností materiálu, které jsou konstruktéry vyhodnocovány je však mnohem více. Pro potřeby konstruktéra se např. pružnost dále popisuje modulem pružnosti v tahu či tlaku  $E$  [MPa], modulem pružnosti ve smyku  $G$  [MPa], objemovým modulem pružnosti  $K$  [MPa] a koeficientem příčné kontrakce  $\mu$  (Poissonovo číslo). Důvodem toho je i povaha fyzikálních experimentů a měření. Fyzikální vlastnosti materiálu se experimentálně stanovují v průběhu jejich vývoje, výroby, použití, prodeje atd. Aby mohla být zkouška opakována, provádí se podle normalizovaného postupu na pracovišti vybaveným normou stanoveným zařízením. [2]

Vlastnosti konstrukčních elastomerních materiálů se v mnoha směrech liší od ostatních konstrukčních materiálů. Rozdíly jsou ve fyzikálních, tak chemických vlastnostech, omezeném teplotním intervalu jejich použití, vlivu času na změny vlastností apod. Proti těmto omezujícím vlastnostem stojí řada předností. Jsou to zejména vysoká elasticita (hyperelasticita), schopnost snášet opakovaně značnou deformaci při dlouhé životnosti, schopnost tlumení (přeměňovat energii mechanickou na tepelnou), chemická stabilita v řadě prostředí, elektrické vlastnosti, nepropustnosti pro tekutiny atd. [2]

Za těmito vlastnostmi stojí jevy, které popisují kinetické teorie pružnosti. Z této teorie vyplývá, že základní vlastností elastomerů je elasticita. Ta se projevuje tím, že elastomerní materiály lze poměrně malou silou snadno deformovat v tahu, tlaku, ohybu, krutu apod. a to v daleko větším rozsahu než jiné konstrukční materiály. Po odstranění deformační síly se deformované elastomerní těleso rychle vrací do původního stavu a nabývá původní

rozměry. Podle skladby elastomerního materiálu je možné dosahovat různě velkých deformací. Podle kinetické teorie pružnosti jsou v elastomerním materiálu, na nějž nepůsobí deformační síly, řetězové makromolekuly v neuspořádaném, zkrouceném stavu. Při působení deformační síly se řetězce rozvinují, napřimují a orientují ve směru působení namáhání, což způsobuje vnitřní napětí. Toto napětí souvisí se snahou řetězců vrátit se do původního stavu - stavu s větší entropií *s*. [2]

Předpokladem této teorie je uspořádání řetězců do takového stavu, aby jejich deformace byla možná a jejich články se mohly otáčet. [2]

Charakterem elastomeru je právě uspořádání řetězců makromolekul a jejich vzájemná reakce v průběhu deformace. Vlastnosti elastomerů lze modifikovat vznikem primárních vazeb mezi makromolekulami, které vznikají při vulkanizaci. Kromě těchto vazeb, existují také mezi molekulami elastomerů mezimolekulární sekundární vazebné síly. Ty jsou však závislé na teplotě. [2]

Pro elastomery je důležitý tvar distribuční křivky molekulových hmot. Čím širší je distribuce molekulových hmot, tím méně je plasticita elastomeru ovlivnitelná teplotou (schopnost tuhé látky zachovat tvarové změny způsobené napětím po uvolnění napětí). Nízkomolekulární části elastomerní kaučukové směsi vulkanizují pomalu a tím ovlivňují vulkanizační proces. Vysokomolekulární části elastomerní směsi jsou naopak houževnaté a zhoršují její zpracovatelnost při přípravě polotovarů. [2]

Vulkanizace kaučukové směsi je fyzikálně-chemický proces, při kterém za působení teploty tlaku po určitý časový interval se kaučuková směs mění na vulkanizát. To znamená, že v látce, která má charakter je převážně plastický, působením fyzikálních sil za dodání tepla po danou dobu dojde chemickým změnám, kdy látka změní svůj charakter na převážně elastický. Látka si zachovává tvar, ve kterém proces vulkanizace proběhl. Výsledný materiálový produkt se nazývá *vulkanizát*. [2]

Vulkanizace kaučukové směsi probíhá v předem stanovených podmínkách teploty tlaku a času, nejčastěji ve vulkanizačních formách. [2]

Vulkanizace elastomerní směsi ve formách neprobíhá v celém objemu, zejména u silnostěnných výrobků ve stejném čase díky špatné vodivosti elastomerní směsi. [2]

Vlastnosti výrobku jsou pak ovlivněny vlastnostmi směsi, vulkanizačními podmínkami, jeho tvarem a rozměry a použitou výrobní technologií. [2]

Pro třídění základních vlastností vulkanizátů se používá normalizační třídění. [2]

K orientačnímu rozlišení je v současné době využíváno základních fyzikální vlastností. Jsou to tvrdost, pevnost, tažnost, elasticita dále strukturální pevnost a hustota. Tyto údaje však nestačí pro posouzení vhodnosti elastomeru pro konstrukční prvek. Pro výběr elastomeru je nutno posoudit vhodnost elastomeru pro funkční podmínky konstrukčního prvku. Proto je nutno stanovit další vlastnosti, jako je odolnost prostředí, v němž bude konstrukční prvek pracovat. Mezi ně patří zejména chemické vlivy prostředí, teplotní zatížení, elektrické vlastnosti, způsob jeho zatížení apod. [2]

Při konkrétním použití je však možné často vysledovat hlavní vlastnost, nebo hlavní vlastnosti namáhání prvku, z toho pak se musí vycházet pro výběr vhodného složení směsi. Nezanedbatelným kritériem je také zvolený-stanovený technologický způsob výroby. [2]

Prakticky lze říci, že požadovaná hlavní vlastnost nemůže být volena bez ohledu na další vlastnosti elastomeru. Jedná se vždy o kompromis vlastností s důrazem na vlastnost hlavní. [2]

Každý výrobek, součást, konstrukční prvek má určitou životnost. Je nutno si uvědomit, že elastomery jsou makromolekulární látky – termosety, ve kterých probíhají jisté procesy stále i po jejich vulkanizaci, zejména v závislosti na čase teplotě a prostředí, po celou dobu jejich existence. Tím je jejich technický život limitován. Vysoká napětí vedou k rychlé změně vlastností a destrukci prvku. Naopak na rychlou změnu odpovídajícího napětí v odpovídajících amplitudách reagují ze všech konstrukčních materiálů nejlépe. [2]

Mezi skutečnosti, ke kterým je nutno při konstrukci elastomerního prvku přihlídnout je vysoký rozptyl číselných hodnot fyzikálních vlastností. Dále nutno se zmínit o skutečnosti, že fyzikální hodnoty jsou měřeny na zkušebních vzorcích vyrobených v úzké toleranci technologických podmínek, navíc za napětí v praxi se nevyskytující. Z toho vyplývá důležitost kontroly konstrukčních fyzikálních veličin přímo na výrobcích. [2]

Z hlediska konstrukčních prvků, je možné způsob namáhání elastomeru rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří staticky namáhané součásti, druhou skupinou jsou dynamicky namáhané součásti (většina elastomerních prvků) a třetí skupinou jsou prvky namáhané rázy. V technické praxi se však nachází výrobky a konstrukční prvky namáhané kombinovaně všemi třemi uvedenými způsoby. [2]



## 2 KAUČUKOVÉ SMĚSI

### 2.1 Kaučuky

Pod pojmem kaučuky rozumíme takové polymery, které mohou být převedeny chemickým (nebo i fyzikálním) zesíťováním v elastomery (pryže). [2]

Kaučuk je základní složkou, která dává směsi i pryži základní charakteristické vlastnosti. Existuje široká škála kaučuků s typickými vlastnostmi, podle nichž volíme vhodný kaučuk pro danou aplikaci. [2]

#### 2.1.1 Přírodní kaučuk (NR) (natural rubber)

Přírodní kaučuk se získává ze stromů kaučukovníku, zejména druhu *Hevea brasiliensis*. Kaučukovníky rostou a přibližně od roku 1900 se i uměle pěstují na plantážích v tropických pásmech Jižní Ameriky, jihovýchodní Asie i Afriky. Po nařiznutí kůry stromu vytéká bílá, mlékovitá kapalina zvaná latex, která obsahuje 30 - 40% koloidních částic kaučuku (koloidní částicí se myslí látky, které nejsou schopny krystalizace). Z jediného stromu lze získat 5 - 25 kg kaučuku. [2]

Před vlastní přípravou směsi se zpracovává tzv. lámáním. Příliš dlouhé řetězce se při něm štěpí účinkem vzdušného kyslíku v místě dvojných vazeb. [2]

Kaučuk se vysráží např. kyselinou mravenčí, vypere vodou a suší, buď jen teplým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa, jinak též uzený kaučuk). [2]

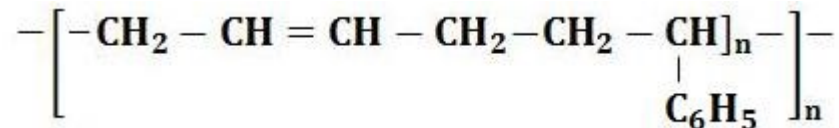
Rozvoj automobilového průmyslu a s ním rostoucí spotřeba kaučuku na výrobu pneumatik přiměl chemiky k hledání odpovídající náhrady přírodního kaučuku. I když se dnes vyrábí desítky druhů různých syntetických kaučuků, přírodní kaučuk se používá stále, protože dodává směsím žádané vlastnosti. Navíc jeho cena je v současné době poměrně příznivá. [2]

#### 2.1.2 Syntetické kaučuky

Hlavní rozdíl mezi přírodními a syntetickými kaučuky spočívá v technologii jejich výroby. U přírodního kaučuku je výrobní proces proveden prostřednictvím přírody, uvnitř stromu, přičemž kaučukovník roste minimálně 6 let, než začne produkovat. Výroba syntetického kaučuku potřebuje výrobu monomerů, nejčastěji z petrochemických surovin, kdy poté dojde k jejich polymeraci. [5]

Průmyslově se vyrábí a používá velké množství syntetických kaučuků, které se liší charakterem monomerů, poměrem monomerů při kopolymeraci, podmínkami výroby a způsobem polymerace, typem katalyzátorů nebo druhem použitých stabilizátorů apod. [5]

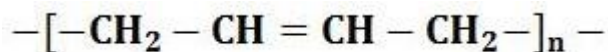
- **Butadien-styrenový kaučuk (SBR)** (styrene-butadiene rubber)



Obr. 2 Strukturní vzorec SBR [4]

Je univerzální kaučuk, který představuje asi 60% světové výroby syntetických kaučuků. Používá se pro běhouny pneumatik a pro tzv. technickou pryž. [2]

- **Polybutadienové kaučuky (BR)** (butadiene rubber)

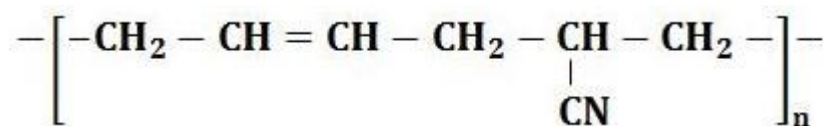


Obr. 3 Strukturní vzorec BR [4]

Vyrábí se především roztokovou polymerací pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů, kdy vznikají produkty s vysokým podílem 1,4-butadienových jednotek. [2]

Polybutadieny s vysokým podílem cis-1,4-butadienových jednotek se vyznačují vysokou odolností proti oděru, vzniku trhlin a také vyšší odrazovou pružností, než přírodní kaučuk. Mimoto dobře snášejí plniva. Aplikují se hlavně v průmyslu k výrobě pneumatik. [2]

- **Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR)** (nitrile-butadiene rubber)

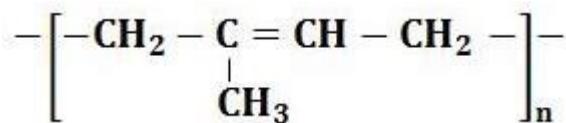


Obr. 4 Strukturní vzorec NBR [4]

Vyrábí se především roztokovou polymerací pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů, kdy vznikají produkty s vysokým podílem 1,4-butadienových jednotek. [2]

Polybutadieny s vysokým podílem cis-1,4-butadienových jednotek se vyznačují vysokou odolností proti oděru, vzniku trhlin a také vyšší odrazovou pružností, než přírodní kaučuk. Mimoto dobře snášejí plniva. Aplikují se hlavně v průmyslu k výrobě pneumatik. [2]

- **Polyisopren (IR)** ( isoprene rubber)



Obr. 5 Strukturální vzorec IR [4]

Přírodní kaučuk je téměř stoprocentní cis-1,4-polyisopren. Syntetický polyisoprenový kaučuk IR je stereospecifický, roztokově polymerovaný cis-1,4-polyisopren, jehož struktura a vlastnosti jsou natolik podobné kaučuku přírodnímu, že je lze ve většině aplikací zaměnit. NR i IR krystalizují tažením za pracovních teplot, což vede k vysokým pevnostem v tahu. Tuto vlastnost nemají SBR, BR ani NBR, jejichž pevnost v tahu lze zlepšit aktivními sazezi. [2]

## 2.2 Skladba kaučukové směsi

Při skladbě směsi je třeba vycházet především z technických požadavků aplikace, pro kterou je daná pryž určena. Musí se přitom zvážit reálné možnosti kaučuku, jeho vlastnosti, možnosti technologického zpracování, výběr přísad z hlediska zpracování a vulkanizačního systému. K těmto závažným hlediskům přistupuje ještě otázka životnosti při používání výrobků za působení kyslíku, ozónu, tepla a dynamického namáhání. Důležitý je také vztah mezi kaučukem a plnivem. Sladit často protichůdná hlediska, daná z jedné strany technickými požadavky aplikace a ze strany druhé reálnými možnostmi technologie je vždy složitý úkol, jehož řešení je někdy otázkou provozních zkušeností a teoretických znalostí, jindy složitým vývojem a vážným technickým problémem. [2]

Kaučuková směs obsahuje zpravidla tyto složky:

- elastomer
- vulkanizační činidlo
- urychlovač vulkanizace
- aktivátor vulkanizace
- ochranné látky proti stárnutí a únavě
- plniva
- změkčovadla
- pigmenty
- nadouvadla [2]

## 2.3 Přířady kaučukových směsí

### 2.3.1 Plniva

Použití plniv v kaučukových směsích má obecně dva důvody. Prvořadým důvodem je úprava zpracovatelnosti směsí a fyzikálních vlastností vulkanizátů. Druhý důvod je ekonomický, použitím levných plniv se dosahuje podstatného snížení ceny výrobku. [2]

Při volbě plniva vycházíme z uvedených záměrů a z dalších technických požadavků.

Pro běžnou praxi vyhovuje rozdělení do tří skupin:

- saze
- světlá plniva (aktivní a neaktivní)
- ostatní [2]

### 2.3.2 Saze

Mezi jedny z nejdůležitějších plniv kaučukových směsí patří saze. Důvodem, proč jsou saze používány je, že saze zlepšují zpracovatelnost kaučukových směsí a upravují fyzikálně mechanické vlastnosti (zejména modul, strukturní pevnost, tvrdost, tažnost, odolnost proti oděru, valivý odpor, záběrové vlastnosti, dynamické vlastnosti, odolnost proti únavě a jiné) a také podstatně snižují cenu výrobku. [2]

Saze mají v kaučuku ztužující účinek, který je tím větší, čím menší jsou částice a čím větší je povrch sazí. [2]

### 2.3.3 Minerální plniva

Minerální plniva, někdy uváděná pod názvem světlá plniva představují velkou skupinu plniv ať již synteticky připravených nebo získaných jako přírodniny. Jejich účinek ve vulkanizátu závisí zejména na jejich velikosti povrchu a také na schopnosti tvořit se základní maticí interakční vztah. [2]

Z tohoto pohledu je možné pohlížet na tato plniva jako na:

- aktivní
- neaktivní
- ostatní [2]

### 2.3.4 Vulkanizační činidla

Podstatou vulkanizace je vytváření chemických vazeb mezi molekulami kaučuku. K tomu, aby se zabránilo neomezenému toku molekul vzhledem k sousedním molekulám stačí poměrně malé množství příčných vazeb rozmístěných podél řetězce. Vlastnosti kaučuku se přitom podstatně mění. Z převážně plastického stavu přechází v elastickou pryž. Zlepšují se vlastnosti jako pevnost, odrazová pružnost, odolnost proti nízkým a vysokým teplotám, roste tvrdost a modul, snižuje se tažnost a trvalá deformace. Vulkanizační činidla jsou látky, které mají schopnost vytvářet chemickou reakcí příčné vazby mezi molekulami kaučuku. Nejběžnější vulkanizační činidla jsou: síra, donory síry, selen, telur, peroxidy, kovové kysličníky, reaktivní pryskyřice, diaminy a diizokyanáty. [2]

Nejčastějším vulkanizačním činidlem je síra, ta se při vulkanizaci váže na kaučuk za tvorby síťové struktury. [2]

### 2.3.5 Urychlovače vulkanizace

Jsou látky, které zkracují dobu vulkanizace z hodin na minuty, snižují vulkanizační teplotu a zpomalují stárnutí. Tyto látky obsahují v molekule dusík a síru. Jejich účinek je různě velký. [2]

Vulkanizační činidlo umožňuje vulkanizaci a urychlovače a aktivátory upravují její průběh, stupeň a do značné míry i mechanické vlastnosti vulkanizátu. Zvyšují síťovací činnost, čímž umožňují omezit dávkování síry. Organické urychlovače podstatně zkracují vulkanizační dobu a zároveň umožňují snížit vulkanizační teplotu, čímž se spoří energie, ale chrání také jiné složky směsi, jako jsou organická barviva či materiál kombinovaný s kaučukem. [2]

Význam urychlovačů vulkanizace spočívá nejen ve zrychlení procesu, ale i ve zvýšení efektivnosti vázání síry a tím ve zlepšení užitečných vlastností pryže (teplotvzdornosti, odolnost proti stárnutí). Spolu se sírou a aktivátory vulkanizace tvoří urychlovače vulkanizační systém. Dále upravují specifické vlastnosti vulkanizátu, jako je modul, pevnost, odolnost proti opotřebení, stárnutí. [2]

### 2.3.6 Retardéry vulkanizace

Použití retardérů vulkanizace je nezbytné pro směsi obsahující vysoce aktivní vulkanizační přísady nebo urychlovače vulkanizace, mají-li se takové směsi zpracovávat při vyšších

teplotách. Retardéry chrání směs před předčasným navulkanizováním při míchání a dalším zpracování. [2]

Retardéry dělíme na:

- anorganické (MgO, PbO)
- organické (octan sodný, kalafuna, kyselina sebaková) [2]

### 2.3.7 Změkčovadla

Změkčovadla zvyšují plasticitu a usnadňují tak mechanické zpracování. Používají se různé minerální oleje. [2]

Ovlivňují v různé míře zpracovatelnost směsí a tím vlastnosti vulkanizátu. Pronikají mezi makromolekuly kaučuku, zvětšují jejich průměrnou vzdálenost, zmenšují propletení, omezují vnitřní tření mezi molekulami a usnadňují tak přeskupování hmoty. Vulkanizát lze pak deformovat menší silou, jsou méně tuhé, mají nižší teplotu křehnutí. Nevýhodou je, že přítomnost změkčovadla zhoršuje mechanické vlastnosti pryže. Zpracovatelností se myslí plasticita, tvarovatelnost a lepivost. [2]

### 2.3.8 Antioxidanty, antiozonanty

I po vulkanizaci zůstávají v zesíťovaném polymeru dvojně vazby, které jsou napadány kyslíkem a ozonem. Obsah ozonu ve vzduchu sice není velký, ale je mnohem agresivnější než kyslík. Vznikají nestabilní peroxidy nebo ozonidy, které se radikálově štěpí a tak dochází k narušení struktury - stárnutí pryže. Tento proces výrazně zpomalují látky zvané antioxidanty a antiozonanty. [2]

Stárnutí elastomerů a vulkanizátů má řadu příčin. Úkolem stabilizace je zpomalit nebo dočasně úplně zastavit průběh stárnutí. [2]

Antidegradenty je možno rozdělit do těchto hlavních skupin:

- antioxidanty a antiozonanty (nejdůležitější)
- činidla chránící proti účinkům světla (UV absorbéry)
- ochranné vosky
- přísady potlačující hydrolyzu funkčních skupin
- akceptory rozkladných produktů [2]

### 2.3.9 Pigmenty

Používají se k vybarvení směsí do různých odstínů. Původně byly pouze minerální pigmenty, které umožňovaly jen omezený rozsah barevných odstínů. Zavedením organických pigmentů necitlivých k vulkanizační teplotě a síře se možnosti vybarvování pryže rozšířily a zvýšila se účinnost vybarvování. Z toho důvodu moderní organické pigmenty, přestože jsou dražší, postupně vytlačují anorganické pigmenty. U bílých nebo světlých se musí použít elastomerů a antioxidantů na světle nebarvících. Jako základního pigmentu se používá litoponu, titanové běloby, řidčeji zinkové běloby, která je drahá a stopy olova v ní obsaženého způsobují při vulkanizaci zšednutí. [2]

### 2.3.10 Nadouvadla

Pro výrobu lehčené pryže se používá různých druhů nadouvadla, což jsou látky, které se při vyšších teplotách v průběhu vulkanizace rozkládají za vzniku většího objemu plynů. Teplota rozkladu a objem plynů závisí především na druhu použitého nadouvadla. Teplotu rozkladu je možno dále ovlivnit přísadami, které působí jako aktivátory rozkladu nadouvadla. Kaučukové směsi musí mít vysokou plasticitu a určitý průběh vulkanizace, aby nadouvání proběhlo v požadovaném rozsahu. [2]

## 2.4 Vulkanizace

Při vulkanizaci se váže síra na kaučuk a tvoří se síťová struktura. Zesíťováním - vulkanizací - se stává z kaučukové směsi technicky použitelný materiál - pryž. [6]

Vulkanizační systém, který ovlivňuje průběh a stav vulkanizace, se zpravidla skládá z vulkanizačního činidla, urychlovače a aktivátoru. Vulkanizační činidlo vulkanizaci umožňuje, urychlovač a aktivátor upravují její průběh a stupeň a do značné míry i mechanické vlastnosti vulkanizátu. [6]

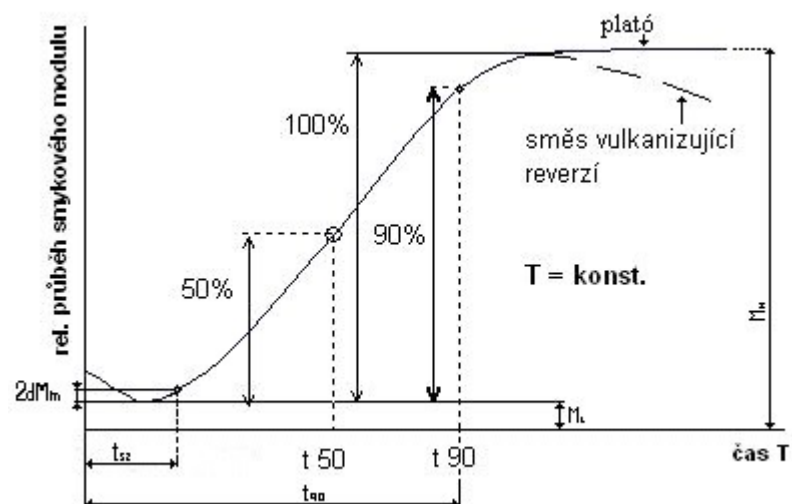
Nejčastěji používaným vulkanizačním činidlem je síra. Mohou to však být i jiné látky, např. peroxidy, oxidy kovů, pryskyřice aj. Tyto se používají především pro speciální kaučuky. Zesíťování lze dosáhnout i fyzikálními způsoby, např. radiací. [6]

Všechny urychlovače lze zařadit do několika málo skupin, které vymezují jejich obecnou volbu a použití. Jejich vhodnou volbou a dávkováním lze splnit prakticky všechny požadavky. Při jeho volbě musíme uvažovat jak vlastnosti pryže, tak také na výrobní technologii. [6]

Po přidání všech složek vulkanizačního systému do směsi při dostatečné teplotě nastává jeho působení. Nejdříve se vytváří aktivní meziprodukt, později vznikají příčné vazby. Jakmile tvorba příčných vazeb dosáhne určitého stupně, mění se zpracovatelské vlastnosti, indikované změnou plasticity. Doba potřebná k dosažení této změny se nazývá bezpečnost směsi. Nejčastěji se určuje vulkanometrem Mooney. Bezpečnost směsi z přírodního kaučuku se určuje zpravidla při teplotě 120 °C, pro směsi z butadienstyrenového kaučuku je vhodnější teplota 140 °C. V praxi se považuje hodnota 20 min. při 120 °C za spolehlivě bezpečnou. Hodnota 10 min. je limitní při dobré kontrole teploty, hodnota 8 min. již ale vede k nezpracovatelnosti směsi. Ekonomická hodnota se pohybuje mezi 15 a 20 min. [6]

Změna indikovaná stoupaním viskozity se prakticky shoduje se začátkem vulkanizace. Pokračováním v zahřívání se vyvíjí příčné vazby a nastává vulkanizace. Její průběh se sleduje vulkanizační křivkou. Následující graf (Obr. 6) se skládá z úseku bezpečnosti směsi a z úseku vulkanizační křivky. Bezpečnost směsi je uvedena jako celková doba  $N$ , po které dojde ke změně zpracovatelnosti směsi. Doba bezpečnosti směsi musí být nejméně tak dlouhá, aby po veškerém nutném přípravném zpracování zůstal ještě podíl  $N_2$ , nutný pro tok a vyrovnání tlaku ve formě, provádí-li se vulkanizace v lise. Kromě nutného tepelného zatížení  $N_1$  a podílu  $N_2$  je potřeba ponechat ještě rezervu  $N_3$ , protože v praxi není možno udržovat tepelnou historii přesně na stejné hodnotě. Navíc je nutno brát v potaz rozdíl ve složení a homogenitě směsi mezi jednotlivými dávkami. Není ovšem účelné, aby hodnota  $N_3$  byla příliš vysoká, protože se tím prodlužuje celková doba vulkanizace. Časový úsek vulkanizační křivky od začátku vulkanizace  $A$  k dosažení optima  $B$  je čistou dobou vulkanizace. Jinou hodnotou je technická doba vulkanizace ( $C - B$ ), kde čistá doba je prodloužena podílem  $N_2$  a  $N_3$ . Technická doba vulkanizace se určuje pro každý výrobek zvlášť a pak jako technický předpis je konstantou. Spotřebuje-li se převážná část nebo celá doba rezervy  $N_3$ , může k ukončení vulkanizace dojít až za optimem vulkanizace, v úseku prodlevy. V případě celé spotřeby pak technická doba vulkanizace odpovídá úseku  $C' - B'$ . Průběh vulkanizace lze obecně sledovat závislostí jakékoliv vlastnosti na čase, nejčastěji pevnosti, viz obrázek (Obr. 6). [6]





Obr. 6 Vulkanizační křivka [1]

K plnému využití vulkanizačního činidla a urychlovače je nutná přítomnost aktivátorů. Jako aktivátoru se používá téměř ve všech směsích oxidu zinečnatého. U přírodního kaučuku je z důvodu kolísání množství mastných kyselin třeba přivádět některou organickou kyselinu, nejčastěji stearovou, aby byl převáděn zinek na formu rozpustnou v kaučuku. Obsah organických kyselin je třeba upravovat i u kaučuků syntetických. [6]

## 3 POJENÍ PRYŽE S KOVEM

### 3.1 Pryžokovové výrobky

Pryžokovové výrobky se začaly používat postupem času s rozvojem průmyslu strojírenství a hlavně automobilního průmyslu. Zpočátku se používaly hlavně celopryžové díly, které byly zamontovány do montážních celků. Konstrukce těchto celků byla mnohdy složitá a díly byly náročné na montáž a neplnily často spolehlivě nároky na ně kladené. Proto byla snaha co nejvíce díly konstrukčně zjednodušit a přitom vytvořit kvalitní spoje. [7]

### 3.2 Požadavky na spoj pryž – kov

Nároky na takovéto výrobky nejsou přitom malé. Kvalitní spoj musí mít:

- pevnost vyšší než je pevnost použité pryže
- musí být odolný působení chemikálií
- musí být odolný působení tepla, UV záření, ozonu
- nesmí poškozovat životní prostředí [7]

### 3.3 Typy spojů

Typy spojů mezi pryží a zálisky můžeme rozdělit do několika kategorií:

- podle pevnosti spoje
- podle typu vytvořené vazby
- podle technologie vytváření vazby [7]

#### 3.3.1 Spoje dle typu vazby

Spoj mezi pryží a záliskem může být vytvořen několika různými postupy:

- **na čistě mechanické bázi:** Pryž je zakotvena v prolisech nebo otvorech v zálisku a pevnost spoje je závislá pouze na tření a mechanické pevnosti pryže proteklé otvory v zálisku. Pryžová část může být na zálisek dokončována dodatečně. V tom-to případě nevznikají na kontaktní ploše mezi výliskem a záliskem žádné chemické ani fyzikální vazby.
- **lepením:** Spoj mezi záliskem a zvulkanizovanou pryží je vytvořen dodatečně pomocí lepidla. Zálisek i výlisek musí být pro lepení již upraveny a musí být použit správný typ lepidla. Při tomto procesu se vytvářejí chemické a fyzikální vazby mezi

záliskem a lepidlem a mezi lepidlem a pryží. Tímto způsobem lze vytvořit relativně pevné spoje.

- **vulkanizací:** Spoj mezi záliskem a pryží je vytvořen speciálním postupem při vulkanizaci ve formě. Je nutná správná předúprava zálišků. Při tomto procesu vytvářejí vazby na chemické a fyzikální bázi. Spoje vytvořené tímto postupem vykazují nejvyšší hodnoty pevností ze všech tří uvedených typů spojů. [7]

### 3.4 Struktura vulkanizačního spoje

Spoj mezi záliskem a pryží se vytváří během vulkanizace. Vlastní struktura spoje obsahuje několik částí:

- zálisek
- povrchová vrstva zálišku s povrchovou úpravou
- primární spojovací prostředek
- sekundární spojovací prostředek
- pryž [7]

Mezi jednotlivými částmi se vytvářejí vazby na fyzikální a chemické bázi. Obecně platí, že spoj je tak pevný, jak je pevný jeho nejslabší článek. Snažíme se tedy při vulkanizaci vytvořit tak pevné spoje, že jejich pevnost je vyšší než pevnost pryžového materiálu.

#### **Spoj zálisek - povrchová úprava zálišku**

Je závislý na typu povrchových úprav zálišků, je vytvořen chemickými vazbami mezi materiálem a chemickými sloučeninami, které obsahuje (např. fosfátem). [7]

#### **Spoj povrchová úprava zálišku - primární spojovací prostředek**

Je vytvořen kombinací mechanického zakotvení spojovacího prostředku v drsné povrchové úpravě a fyzikálních sil. [7]

#### **Spoj mezi primárním a sekundárním spojovacím prostředkem**

Je vytvořen na základě chemických vazeb. [7]

#### **Spoj spojovací prostředek - pryž**

Je vytvořen chemickými vazbami. Na tomto spoji se také vytváří přechodová vrstva, protože sekundární spojovací prostředek při vulkanizaci difunduje do pryže. Tato přechodová vrstva je tvrdší než vlastní pryž. [7]

Rychlost vytváření jednotlivých vazeb je různá. Proto složením kaučukové směsi a podmínkami vulkanizace musíme vždy dosáhnout toho, aby chemické reakce probíhaly současně. Pokud tomu tak není, ať již z důvodu různé reakční rychlosti, nebo proto, že nezačínají současně, nedojde k vytvoření kvalitního spoje a objeví se separace vrstev. Kvalitně vytvořený spoj musí být vytvořen na celé styčné ploše. Kontrola kvality spojů se provádí na speciálních laboratorních tělíscích při trhacích zkouškách. Přitom dochází k destrukci tělíška a podle umístění lomu na tělísku rozlišujeme jednotlivé vady:

- M - jedná se o separaci mezi povrchovou úpravou zálisku a spojovacím prostředkem
- RC - jedná se o separaci mezi spojovacím prostředkem a pryží
- R - jedná se o lom v pryži. Lom mezi přechodovou vrstvou pryže a vlastní pryží spadá už do této kategorie [7]

U pryžokovových dílů s kvalitně vytvořenými spoji dochází při destrukci vždy k lomům v pryži. [7]

### 3.5 Zálisky

Zálisky vytvářejí pevnou výztužnou část na výlisku a jsou svými mechanicko- fyzikálními vlastnostmi odlišné od pryže. Zpravidla jsou kovové nebo plastové, v případě plastů se používají pouze typy schopné snášet bez tvarových deformací podmínky vulkanizace.

Zálisky jsou zpravidla upevněny na vyšší montážní celek a přenášejí namáhání na pryžovou část dílu. [7]

Pro pojení lze použít každého kovu, musí ale projít vhodnou povrchovou úpravou. Nejvhodnější a nejpoužívanější k pojení jsou oceli a hliníkové slitiny. Čím je ocel z hlediska materiálového složení kvalitnější, tím je náročnější na provedení povrchové úpravy, aby se dosáhlo kvalitního spoje. [7]

Při povrchové úpravě dochází k odstranění chemických a mechanických nečistot z povrchu zálisků a k nánosu speciálního spojovacího prostředku. [7]

Pod pojmem mechanické nečistoty si můžeme představit například prach, zamaštění povrchu nebo jiným způsobem ulpělé cizorodé částice na povrchu zálisku. Ty jsou na povrchu zálisků udržovány pouze fyzikálními silami (adhezí), nikoliv silami chemickými. [7]

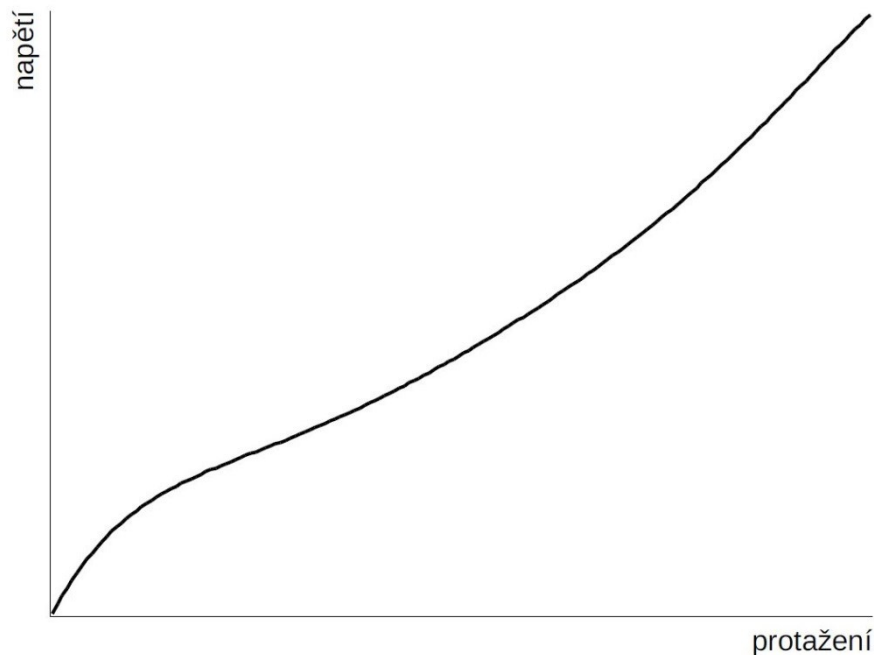
Chemické nečistoty jsou korozní zplodiny na povrchu zálisku vzniklé při výrobě zálisku či jeho polotovaru nebo vzniklé působením chemikálií na povrch zálisku (např. znečištěného

ovzduší). Oba typy nečistot musí být při povrchové úpravě odstraněny, jinak není možno dosáhnout kvalitního spoje. [7]

## 4 HYPERELASTICITA

Elastomery se vyznačují některými charakteristickými rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních materiálů (ideálně elastických). Souhrn těchto vlastností je často označován jako hyperelastická a tyto materiály pak považujeme za hyperelastické. Hlavními znaky hyperelasticity jsou:

- Dosažitelné elastické (vratné) deformace jsou veliké, mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika set procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci je silně nelineární. Tvar této závislosti má zpravidla charakteristický esovitý průběh (obr.).
- Materiál se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je asi deset-tisíckrát menší než u ideálně elastických látek
- Objemová tuhost většiny elastomerů je velmi vysoká. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa, a s uvažováním předchozího bodu (tj. malého poměru ku deformaci) se pak Poissonův poměr blíží hodnotě 0,5 (v závislosti na obsahu plniv). To znamená, že většinu těchto materiálů lze považovat za objemově nestlačitelné. [1]



Obr. 7 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [1]

Dalším charakteristickým rysem elastomerů je časová závislost deformace. Elastické

deformační přeměny tu probíhají s určitým zpožděním, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování pryže má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se označuje jako viskoelastické chování.

Mechanické chování elastomerů je dále velmi závislé na teplotě. Při nízkých teplotách (pod  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tuhost materiálu výrazně roste a může se přiblížit vlastnostem kovů. Při vysokých teplotách (nad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) naopak dochází k velkému poklesu tuhosti. [1]

Z tohoto popisu je zřejmé, že pro použití Hookeova zákona nejsou splněny dvě základní podmínky: závislost deformace na napětí není lineární a dochází k velkým deformacím ( $>2\%$ ). Přesto je tento vztah s dostatečnou přesností použitelný v aplikacích kde se nepředpokládají velké deformace zatěžovaného prvku. Pro přesné výpočty a pro případy větších deformací je nutno použít nelineární popis závislosti napětí-deformace. [1]

#### 4.1 Hyperelastické materiálové modely

Intenzivní vývoj nelineárních hyperelastických materiálových modelů probíhá od 2. pol.20. století. Tyto modely jsou založeny na definici vztahu pro hustotu deformační energie  $W$ . Tyto modely jsou nezávislé na rychlosti a historii deformace. [1]

Část hyperelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů (např. Neo-Hookean, Arruda-Boyce). Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam. Další skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby model co nejlépe aproximoval toto pozorování. Takové modely (např. Polynomic-ky, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Gent) jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam. [1]

Dnes používané hyperelastické modely obecně formulují vztah pro hustotu deformační energie ve tvaru:

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

kde  $I_i$  jsou invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace,  $\lambda_i$  jsou hlavní protažení a  $\{M\}$  je množina materiálových konstant. [1]

Protážení  $\lambda_i$  je poměrem deformované délky  $l_i$  ve směru osy  $i$  ku původní délce  $l_{0i}$ . [1]

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

Deformační invarianty  $I_i$  jsou definovány vztahy:

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

Pro nestlačitelné materiály je invariant  $I_3 = 1$ . [1]

Pokud známe funkci  $W$ , můžeme napětí vypočítat jako derivaci této funkce podle příslušné složky deformace:

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

kde  $S_{ij}$  jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a  $C_{ij}$  jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. [1]

Pokud je souřadný systém zvolen tak, že je shodný s hlavními směry deformace, pak je pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován takto: [1]

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

Z rovnice (4) lze tedy odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$t_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} C_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} C_{ij}^{-1} \quad (6)$$

kde  $p$  je nespécifikovaný tlak a  $\delta_{ij}$  je Kronekerovo delta, pro které platí ( $\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j$ ). [1]



## 4.2 Přehled hyperelastických modelů FEM systémů

Jednotlivé hyperelastické modely se liší definicí funkce hustoty deformační energie  $W$ . Níže jsou uvedeny dnes nejpoužívanější tvary funkce  $W$ , které jsou většinou pojmenovány po svých autorech. [1]

### Polynomická funkce

Polynomická forma je založena na prvním a druhém deformačním invariantu ( $I_1, I_2$ ). Jde o model, jenž má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (7)$$

kde  $c_{ij}$  jsou materiálové konstanty a za  $N$  se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota  $N$  vyšší než 3. Tato forma může být aplikována pro deformaci dosahující až 300 %. [1]

### Neo-Hookean

Model Neo-Hookean patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Je možné ho brát, jako podmnožinu polynomické formy pro  $N = 1$ ,  $c_{01} = 0$ ,  $c_{10} = \mu/2$ . Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomeru. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci:

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (8)$$

kde  $\mu$  je počáteční smykový modul:

$$\mu = nkT \quad (9)$$

kde  $n$  je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je absolutní teplota. [1]

Model je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání. [1]

### Yeoh

Model Yeoh je podobný polynomické formě, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Jeho výhodou je naopak jeho jednoduchost. Je definován jako:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (10)$$

kde  $c_{i0}$  je materiálová konstanta a za  $N$  se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota  $N$  vyšší než 3. Pokud  $N = 1$  jde o model Neo-Hookean. [1]

Yeoh model je obvykle uvažován s  $N = 3$ . Tří-parametrový Yeoh model obecně poskytuje dobré výsledky pro deformace velkého rozsahu i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty deformace. [1]

### Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. stol. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů. [1]

Používají se dvou, tří, pěti a devíti-parametrové Mooney-Rivlin modely, které také můžeme považovat za speciální případy polynomické formy. [1]

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

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

kde  $c_{10}, c_{01}$  jsou materiálové konstanty. [1]

Tří-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro  $N = 2$  a  $c_{20} = c_{02} = 0$

$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3) + c_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (12)$$

kde  $c_{10}, c_{01}, c_{11}$  jsou materiálové konstanty. [1]

Pěti-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro  $N = 2$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (13)$$

kde  $c_{10}, c_{01}, c_{11}, c_{20}, c_{02}$  jsou materiálové konstanty. [1]

Devíti-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro  $N = 3$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (14)$$

kde  $c_{10}, c_{01}, c_{11}, c_{20}, c_{02}, c_{30}, c_{21}, c_{12}, c_{03}$  jsou materiálové konstanty. [1]

Dvou-parametrový model je využíván do 90-100 % tahové deformace, ale nemusí být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení. Pěti nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro deformace až do 300 %. [1]

### Arruda-Boyce

Arruda-Boyce je model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Arruda-Boyce může být uvažován jako rozšíření modelu Yeoh pro  $N = 5$ , kde konstanty mají reálný význam. [1]

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (15)$$

kde konstanty  $C_i$  jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750} \quad (16)$$

kde  $\mu$  je počáteční smykový modul (stejně jako u modelu Neo-Hookean) a  $\lambda_L$  je tzv. "limitní protažení" sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, při kterém už se síť dál neprotahuje a napětí se začíná blížit nekonečnu. Jestliže se  $\lambda_L$  rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. Model je vhodný pro deformaci do 300 %. [1]

### Gent

Gentův model je podobný formulačně složitějšímu modelu Arruda-Boyce, jelikož také užívá konceptu limitního síťového protažení, nevychází však z modelu vnitřní struktury elastomerů. [1]

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln \left( 1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (17)$$

kde  $E$  je počáteční modul pružnosti, který je pro nestlačitelné materiály  $3\mu$ .  $I_m$  je limitní hodnota členu  $(I_1 - 3)$ , analogická k  $\lambda_L$  v Arruda-Boyce modelu. Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu Yeoh. Jestliže se  $I_m$  bude rovnat nekonečnu, model opět přejde na formu Neo-Hookean. Výhody modelu spočívají v jeho jednoduchosti (pouze dvě materiálové konstanty) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napět'ové deformační odezvy. [1]

### Ogden

Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. Tento model je dnes širou měrou používán a poměrně dobře vystihuje chování elastomeru i při velkých deformacích. [1]

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (18)$$

kde  $\mu_i$  a  $\alpha_i$  jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu ( $\mu_i$  mají však obecně význam počáteční tuhosti). Za  $N$  se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota  $N$  vyšší než 3. [1]

Pro  $N = 1$ ;  $\alpha_i = 2$  a  $\mu_1 = \mu$  se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 2$ ;  $\alpha_2 = -2$ ;  $\mu_1 = 2c_{10}$  a  $\mu_2 = 2c_{01}$  Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden může být obecně aplikován pro deformaci do 700 %. [1]

Mezi další modely, které vycházejí z polynomického modelu, patří [8]:

### 2nd – order invariant

$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3) + c_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20} (I_1 - 3)^2 \quad (19)$$

### 3rd – order deformation

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

### Signiorini

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

### Kloaner – Segal

$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3) + c_{20} (I_1 - 3)^2 + c_{03} (I_2 - 3)^3 \quad (22)$$

Výše uvedené vztahy jsou v důsledku předpokládané objemové nestlačitelnosti elastomerů nezávislé na třetím invariantu  $I_3$  pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. Pro případné zahrnutí objemové stlačitelnosti "téměř nestlačitelných" elastomerů je funkce  $W$  doplněna o aditivní člen  $W_{vol}$  závislý na  $I_3$  (respektive poměrné objemové deformaci  $J$ , pro kterou platí  $I_3 = J^2$ ) a objemovém modulu  $K$ . Níže je stručný přehled tvaru  $W_{vol}$  používaných v uvedených modelech: [1]

$$W_{vol} = \frac{K}{2} (J - 1)^2$$

$$W_{vol} = \frac{K}{4} ((J - 1)^2 (\ln J)^2)$$

$$W_{vol} = K(J \ln J - J + 1)$$

$$W_{vol} = \frac{9K}{2} \left( J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2$$

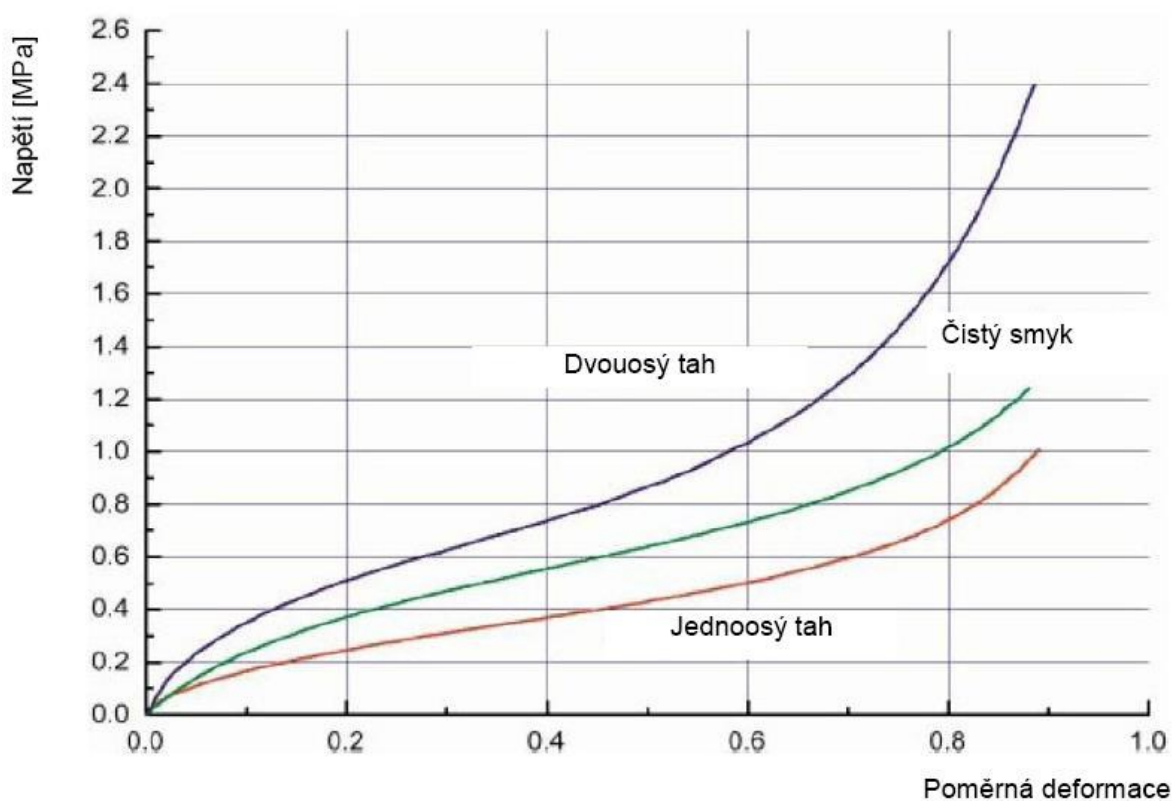
$$W_{vol} = \frac{K}{2} \left( \frac{J - 1}{2} - \ln J \right) \quad (23)$$

## 4.3 Stanovení materiálových konstant pro hyperelastické modely

Jednoduché lineární modely jsou založeny na modulu pružnosti a Poissonově konstantě. Tyto parametry lze stanovit poměrně jednoduše na standardních sériově vyráběných zaří-

zeních. Avšak, pro stanovení materiálových konstant nelineárních hyperplastických modelů je nutno v materiálu dosáhnout i dalších módu namáhání. Pro tento způsob zatížení jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení. [9]

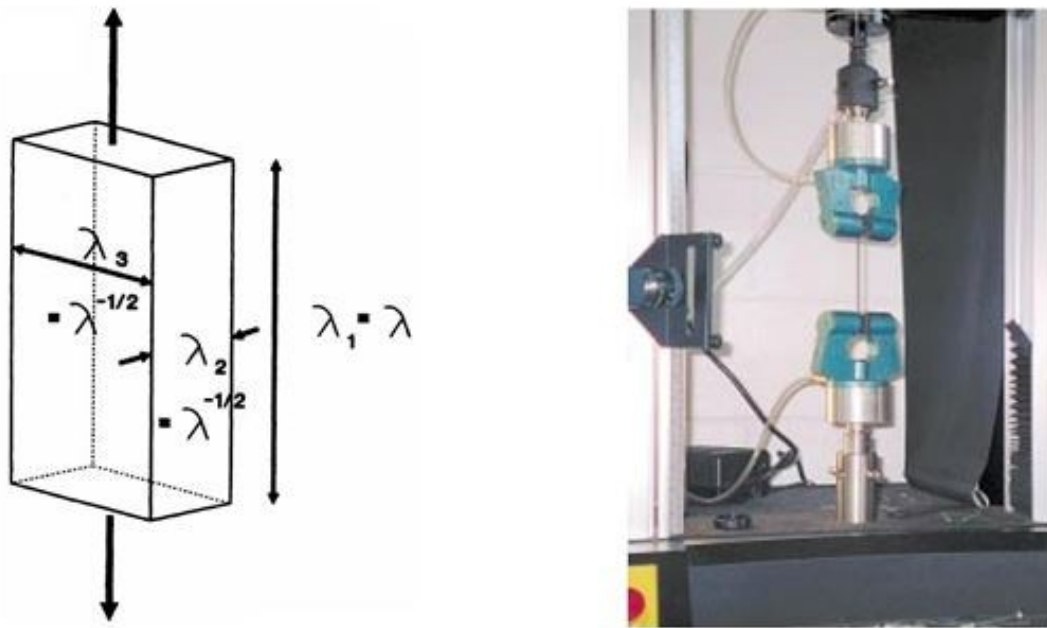
Abychom získali přesné parametry do hyperelastických modelů musíme materiál zkoušet v jednoosém tahu, dvouosém tahu a čistém smyku. Vzhledem k různorodosti elastomerů je nutné pro každou konkrétní analýzu přesně stanovit materiálové konstanty daného materiálu. Požadovaným výstupem z testů je vždy celá křivka závislosti napětí/deformace pro daný způsob zatěžování. [9]



Obr. 8 Příklad chování konkrétního elastomeru v jednotlivých módech zatěžování [1]

#### 4.3.1 Zkouška jednoosým tahem

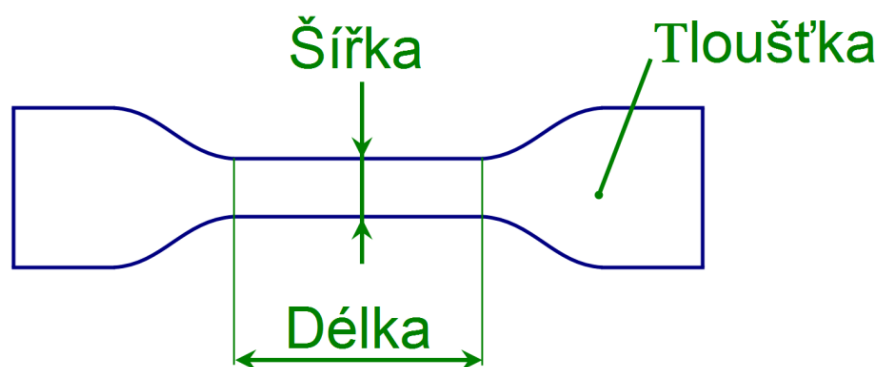
Jednoosý tah lze testovat na univerzálních zkušebních strojích. V tomto případě je vzorek materiálu roztahován ve směru jediné osy. [9]



Obr. 9 Jednoosý tah [9]

**Princip zkoušky:**

Zkouška byla prováděna dle příslušné normy ČSN ISO 37 – 1A na trhacím stroji. Zkušební tělesa ve tvaru plochých oboustranných lopatek byla upnuta do čelistí trhacího stroje tak, aby osa zkušebního tělíska byla totožná s osou upínacích čelistí. Zatěžující síla se postupně plynule zvětšovala, až do přetržení zkušebního tělíska. V průběhu zkoušky se měřila velikost zatěžující síly a prodloužení tělíska. Šířka pracovní části byla 30 mm, délka pracovní části 6 mm a tloušťka 2 mm (Obr. 10). [10]



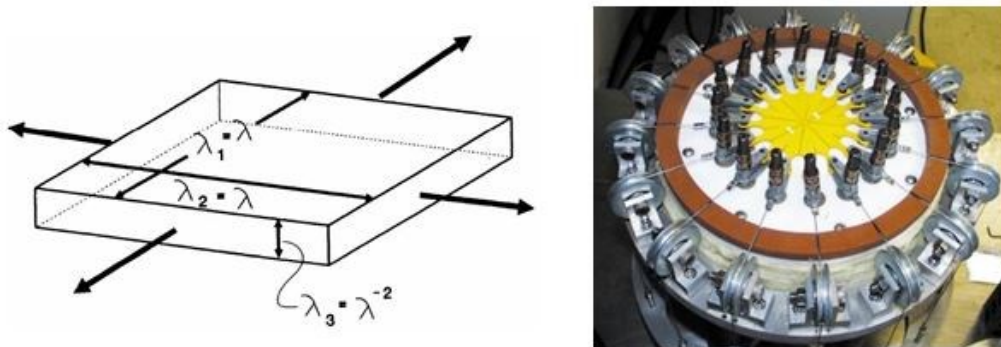
Obr. 10 Rozměry zkušebního tělesa [10]

**4.3.2 Zkouška dvouosým tahem**

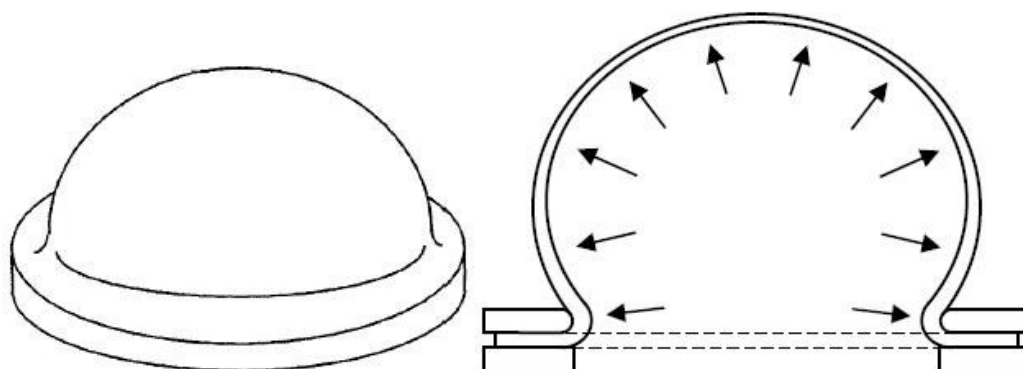
Při dvouosém zatížení je nutno plochý vzorek materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny (dohází k tomu např. při nafukování míče). Tohoto stavu lze dosáhnout několika

způsoby, již zmíněným vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem, roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů, nebo roztahováním kruhového vzorku radiálně ve směru od středu. [9]

V současné době neexistuje žádná zkouška pro dvouosý tah, která by byla normalizována ISO normou.



Obr. 11 Dvouosý tah [9]

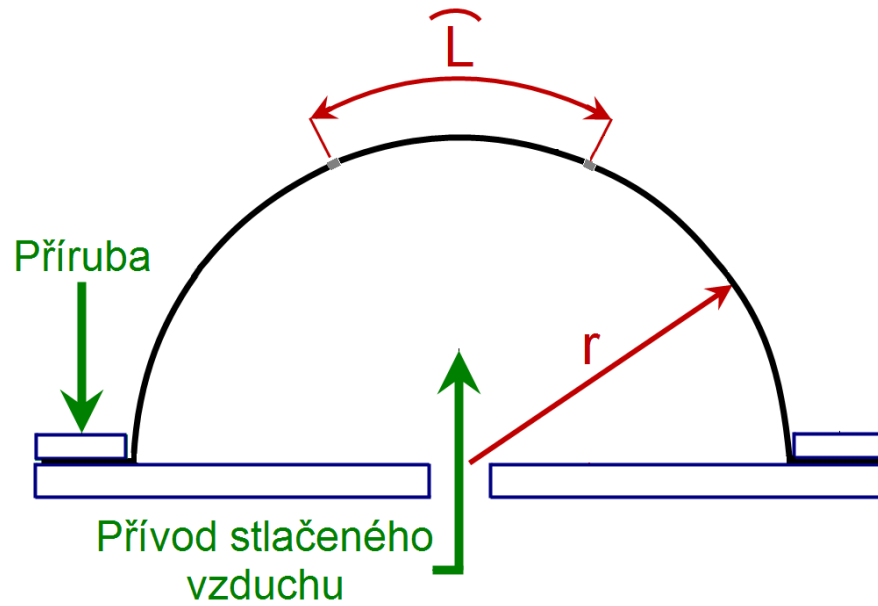


Obr. 12 Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku [9]

### Princip zkoušky:

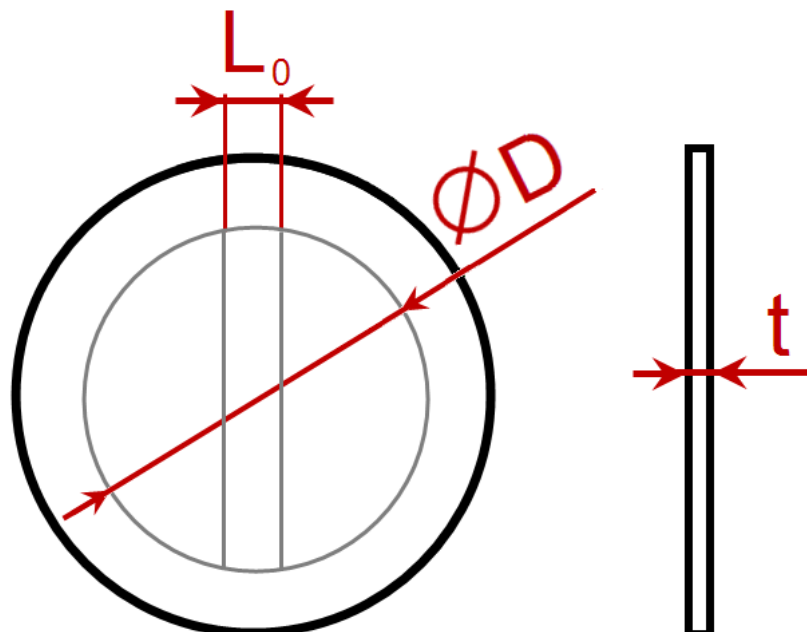
Zkušební vzorky kruhového tvaru byly upnuty po okrajích přírubami, jak je znázorněno na Obr. 13. Kompresorem vháněný vzduch nafukoval vzorky, tím docházelo na vrcholu bubliny dvouosému protahování. Odečítaly se okamžité hodnoty tlaku, příslušná délka a poloměr sledovaného fragmentu plochy promítnutého do roviny, ve které byl vzorek digitálně snímán pomocí fotoaparátu. Z takto získaných hodnot byly vypočteny potřebné charakteristiky z dvouosého protahování. [10]





Obr. 13 Princip použité metody pro dvouosé protahování [10]

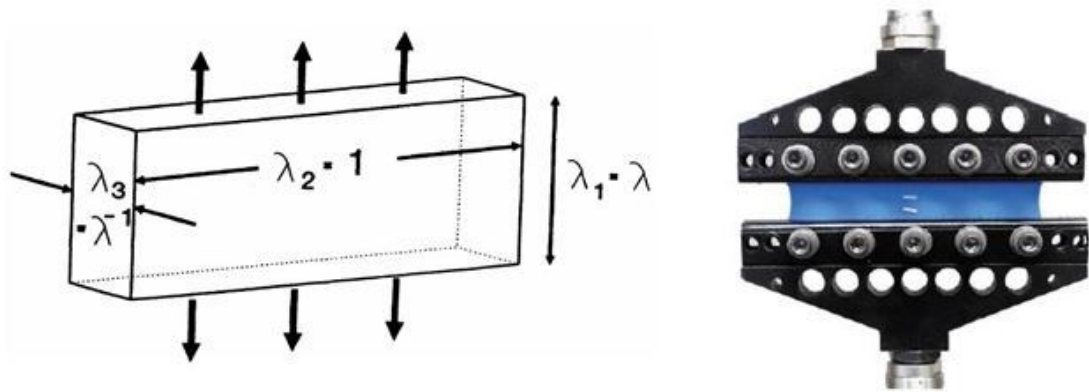
Zkušební vzorky mají při této metodě kruhový tvar s orýsováním, což umožňovalo přesně odečítat jejich rozměry zvětšující se současně s rostoucím tlakem. Tloušťka vzorků  $t = 2$  mm a průměr  $D = 50$  mm. Vzdálenost dvou úseček, která se odečítala, měla počáteční vzdálenost  $L_0 = 10$  mm (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.). [10]



Obr. 14 Rozměry zkušebního vzorku [10]

### 4.3.3 Zkouška čistým smykem

Čistého smyku lze v tělese dosáhnout natahováním podélného vzorku, jehož výška je alespoň 10x menší než jeho šířka. [9]

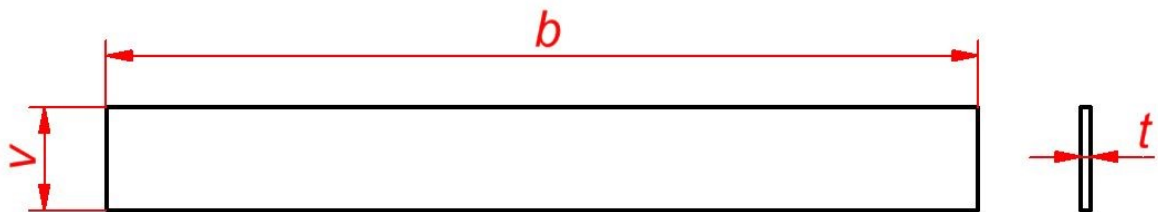


Obr. 15 Čistý smyk [9]

#### Princip zkoušky:

Tento typ zkoušky se realizuje na klasickém zkušebním stroji pro tahovou zkoušku. Vzorek obdélníkového tvaru s velmi vysokým poměrem šířky k délce (cca 10) se upne do speciálních čelistí (Obr. 15) a je natahován. Účelem čelistí je zabránění příčných posuvů vzorku a vytvoření tahu při rovinné deformaci. Vzhledem k tomu, že příčné posuvy jsou nulové, musí být nulové i příčné přetvoření a vzorek je tedy zatěžován v rovinné deformaci.

Zkušební vzorky mají při této metodě tvar obdélníka. Tloušťka vzorků  $t = 2$  mm, šířka  $b = 170$  mm a výška  $v = 20$  mm.



Obr. 16 Rozměry zkušebního vzorku

## 5 STABILIZÁTOR AUTOMOBILU

### 5.1 Funkce stabilizátoru

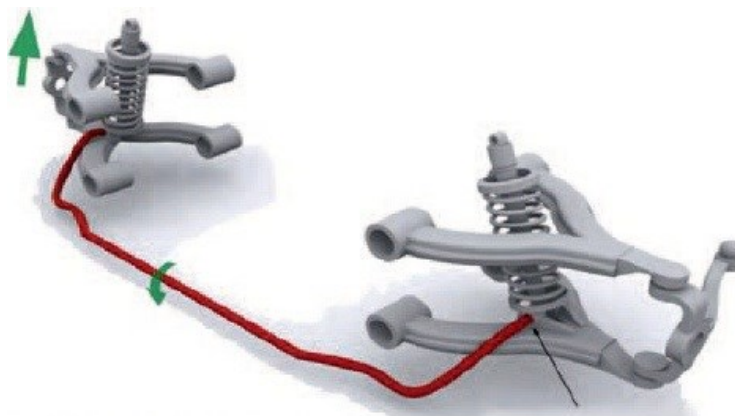
Stabilizátor je prvek zavěšení, který spojuje pravou a levou část nezávisle odpružené nápravy Obr. Účelem stabilizátoru je zmenšit klopení karoserie při průjezdu zatáčkou. Klopení karoserie vozu v zatáčce má nepříznivý vliv na kinematiku zavěšení a postavení kola vůči vozovce. Postavení kola vůči vozovce ovlivňuje přenesené síly na vozovku a tím i bezpečnost jízdy. Stabilizátor kromě zmenšení klopení v zatáčkách ovlivňuje i přetáčivost či nedotáčivost vozidla v zatáčce. Jako důsledek užití stabilizátoru dochází ke změně zatížení kol na nápravě. Tato změna ovlivňuje síly přenositelné pneumatikou na vozovku. Tuhost stabilizátoru na přední a zadní nápravě je možné ovlivnit přetáčivost či nedotáčivost vozu. [11]

### 5.2 Konstrukční řešení stabilizátoru

#### 5.2.1 U-stabilizátor

Stabilizátor tvaru U je nejběžnější konstrukce stabilizátoru u osobních automobilů. Hlavní výhodou je konstrukční jednoduchost a nízké výrobní náklady. Stabilizátor na Obr. 17 představuje červená zkrutná tyč. Při stejnosměrném pohybu kol se tyč otáčí v uložení. Při nestejnosměrném pohybu je tyč na obou krajích zatěžována opačně orientovanými silami. Tyto síly vyvolávají namáhání ohybem (krajní ramena) a krutem (střední část).

Tuhost stabilizátoru závisí na velikosti deformace tyče. Deformace je závislá na geometrických parametrech tyče, zvláště na délce ramen, délce střední části a průměru tyče. [11]

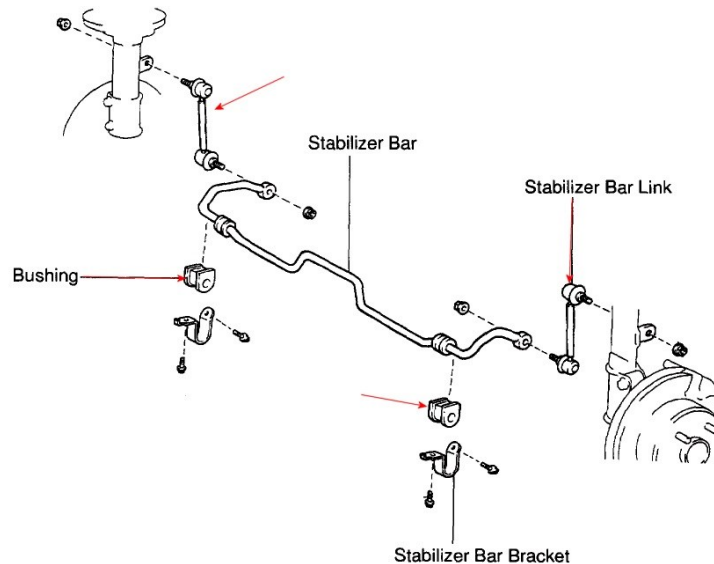


Obr. 17 U-stabilizátor [12]

Druhou aktivní variantou zapojení stabilizátoru je systém užitý na Obr. 18. Stabilizátor není pevně zasazen do ramene nápravy, ale je spojen pomocí táhla. [11]

Výhodou tohoto řešení je menší namáhání tyče ve spoji s mechanismem. [11]

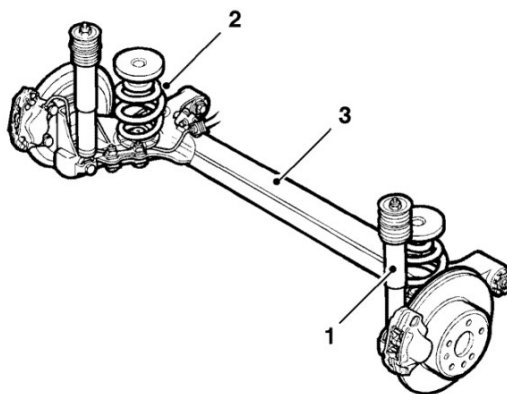
Nevýhodou tohoto řešení je častý vznik vůli v kloubovém uložení. [11]



Obr. 18 U-stabilizátor s táhlem [13]

### 5.2.2 Torzní příčka

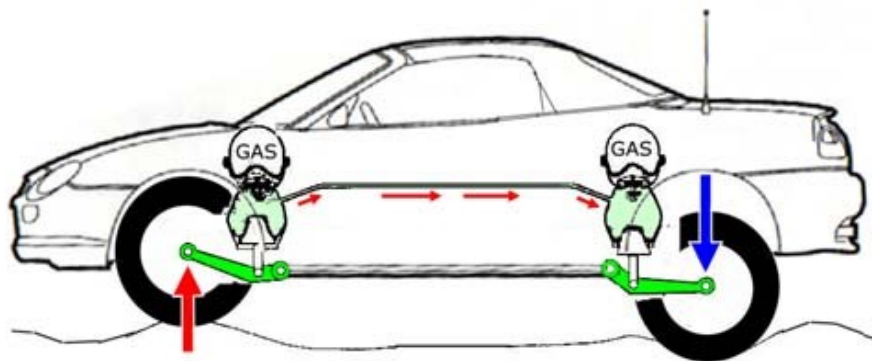
Torzní příčka je řešení často užívané na nepoháněných zadních nápravách osobních automobilů. Kliková náprava na Obr. 19 má ramena spojena pomocí U profilu. Při stejnosměrném propružení tento profil udržuje díky své velké ohybové tuhosti pozici obou kol vůči sobě neměnnou. Při nestejnsměrném propružení dochází k deformaci krutem a příčka slouží jako stabilizátor. [11]



Obr. 19 Kliková náprava [14]

### 5.2.3 Hydropneumatické odpružení

System hydropneumatického odpružení byl poprvé testován na automobilu Citroen DS v letech 1955 až 1968. Tento systém nepoužíval k odpružení vozu konvenční konfiguraci tlumič a vinuta pružina, nýbrž hydropneumatické odpružení. Tento systém odpružení byl sériově nasazen ve voze Citroen Xantia. System hydraulicky spojuje pravou a levou část nápravy a umožňuje tak ovlivnit klopnou tuhost v závislosti na jízdních podmínkách.



Obr. 20 Hydropneumatické odpružení [15]

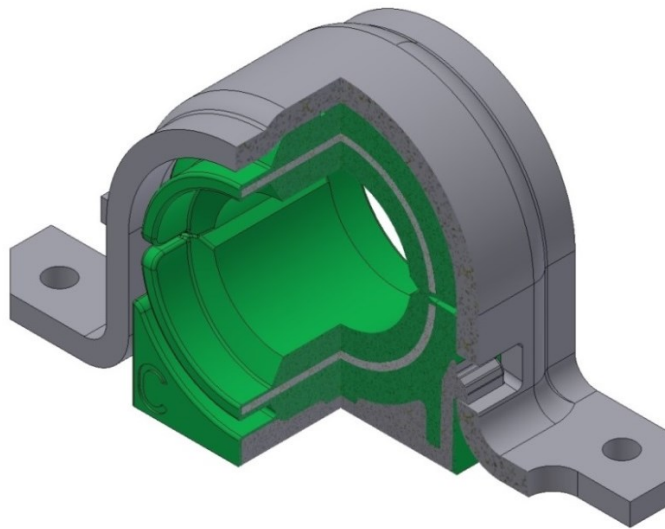
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLŮ

Cílem této diplomové práce je numerická analýza pomocí plošného (2D) modelu a aplikace zatížení pryžového uložení stabilizátoru automobilu. Analýza byla provedena na vytvořených plošných (2D) a na převzatých (3D) modelech, pomocí metody konečných prvků (FEM). Získané výsledky se vyhodnocovaly a porovnávaly s naměřenými experimentálními daty.

### 6.1 Popis pryžového uložení stabilizátoru automobilu

Uložení se skládá ze dvou pryžových pouzder, mezi které je sevřen stabilizátor. Pryžové pouzdra mají hliníkové jádro, které má zaoblený tvar. Do jádra jsou vyrobeny otvory, které slouží k lepší propojení s pryžovým pouzdrem (viz Obr. 22). Sevření pouzder zajišťuje kovová objímka, která se přišroubuje k základně, čímž vzniká svěrný spoj pryžových pouzder a stabilizátoru.



Obr. 21 Uložení stabilizátoru automobilu



Obr. 22 Hliníkové jádro

## 6.2 Zatížení

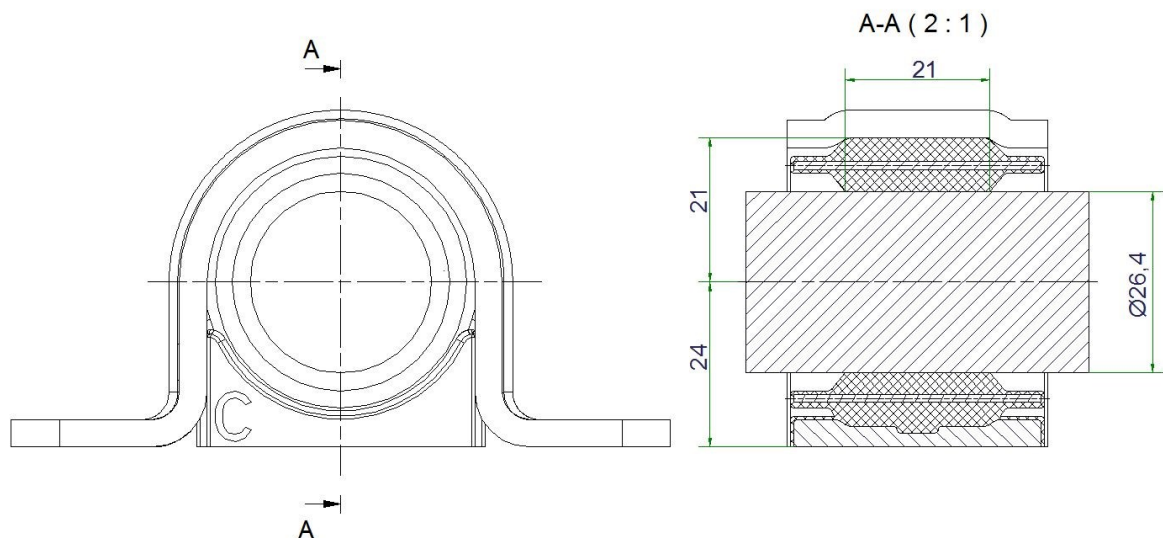
Uložení stabilizátoru bylo po montáži do kovové objímky vystaveno axiálnímu, radiálnímu a torznímu zatížení.

Radiální zatížení	8 000 N
Axiální zatížení	1 600 N
Torzní zatížení	0,4 rad

Tab. č. 1 Aplikované zatížení

## 6.3 Podklady pro analýzu

Potřebné podklady pro provedení analýzy byly dodány. Jednalo se o rozměrové výkresy jednotlivých dílů, 3D modely jednotlivých dílů ve formátu „stp“, montážní výkres (viz Obr. 23) a také 3D analýzy zatížení. Součástí podkladů byly také zpráva o provedených reálných testech.



Obr. 23 Montážní výkres

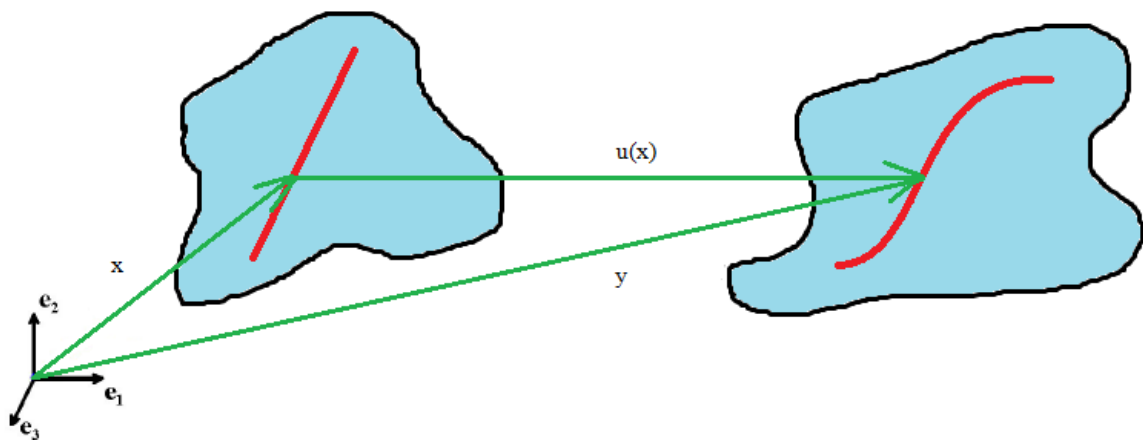


## 7 FEM ANALÝZY, SYSTÉMY A SOFTWAREVÁ PODPORA

### 7.1 FEM

FEM = **F**inite **E**lement **M**ethod (Metoda konečných prvků)

Slouží k řešení parciálních derivačních rovnic. FEM je zobecněna Ritz-Galerkinova variační metoda, užívající bázových funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky [16]



Obr. 24 Vektor posunutí bodů  $u(x)$  tělesa

V mechanice pevných těles je FEM využívána především k popisu a řešení "pole posunutí" v tělese zatíženém vnějšími silami. Pokud známe vektory posunutí  $u(x)$  bodů tělesa, můžeme určit deformační a napěťové pole. [16]

Dva základní typy FEM analýzy pevných těles:

- **statický** - rovnováha vnitřních a vnějších sil působících na těleso. Tato analýza není závislá na čase.  $F=0$
- **dynamický** - např. vibrace, šíření vln, rychlé děje (exploze, rázy). Tato analýza je závislá na čase.  $F=m \cdot a$

FEM systémy obecně pracují v následujícím pořadí: V preprocesoru se vytváří geometrický model, definují se jeho vlastnosti a také materiálové vlastnosti, vytváří se na něm síť, která obsahuje určitý počet elementů (počet závisí na přesnosti výpočtu) a stanovují se okrajové podmínky spolu s uchycením a zatížením. Takto definovaný a zatížený model je později podroben výpočtu v tzv. solveru. Vypočtené výsledky (deformace, posunutí aj.) jsou zobrazovány v postprocesoru. [16]

## 7.2 SOFTWAREVÁ PODPORA

Numerická analýza pryžového uložení stabilizátoru automobilu byla provedena pomocí více druhů softwaru. Pro tvorbu geometrických 2D a 3D modelů byly použity programy Autodesk Inventor Professional 2014 a Autodesk AutoCAD Mechanical 2014, které jsou určeny převážně pro 2D a 3D počítačové konstruování. Pro přípravu a výpočet FEM to byly programy MSC.Patran a MSC.Marc.

Obecně platí, že postup analýzy je rozdělen do tří základních fází:

- Preprocessor – slouží k zadání vstupních dat a parametrů pro výpočet. K Tomuto účelu byl použit software MSC.Patran.
- Solver (řešič) – provádí řešení (výpočet) analýzy. Jako solveru bylo využito programu MSC.Marc.
- Postprocessor – slouží k zpracování a vyhodnocování výsledků analýz, zde také byl použit software MSC.Marc. [4]

### 7.2.1 MSC.Patran

Jedná se o další z mnoha produktů firmy MSC Software. Produkt PATRAN je obecný preprocessor a postprocessor vhodný pro všechny programy firmy MSC Software. Jeho otevřená architektura ho však umožňuje použít pro přípravu konečno-prvkových modelů a načítání výsledků pro libovolný MKP software. Je určen pro přípravu modelů pro lineární či nelineární úlohy.

Proces tvorby konečno-prvkového modelu je poměrně časově náročná úloha, která průměrně zabírá 60% celkového času analýzy daného problému. PATRAN obsahuje všechny důležité nástroje pro přípravu a tvorbu úloh MKP. Obsahuje funkce pro import geometrických modelů, jejich úpravu a čištění. Dále obsahuje nástroje pro vlastní tvorbu konečno-prvkové sítě, tj. jak manuální tak automatickou tvorbu. Obsahuje také mnoho funkcí pro zadávání okrajových podmínek. Provádí automatickou tvorbu vstupních souborů pro většinu populárních MKP řešičů. Obsahuje mnoho funkcí pro získání výsledků a jejich další zpracování jednak v textové a také grafické formě. [17]

Program také obsahuje vnitřní skriptovací jazyk pomocí kterého lze mnoho činností automatizovat, popřípadě dodat další funkcionalitu do vlastního prostředí. [17]

### 7.2.2 MSC.Marc

Program MSC.MARC/MENTAT slouží k numerickému řešení úloh v oblasti fyziky a používá deformační variantu MKP. Tímto programem je možno řešit široké spektrum úloh statiky, kinematiky, dynamiky, pružnosti a pevnosti, úloh mechanického kontaktu těles, creepu, lomové mechaniky, únavy materiálu, popisu chování zemin a hornin, termomechaniky, přenosových jevů, dále také problémy akustiky, proudění tekutin, elektromagnetismu atp. Při vlastním řešení lze uvažovat různé typy materiálů (kovy, kompozitní materiály, plasty, pěny, pryže, skla, zeminy aj.). Kvalita a přednosti tohoto software spočívají především v široké možnosti řešení nelineárních úloh. Velikou pomocí při řešení komplikovaných úloh mohou být také adaptivní změny sítě, zatížení a okrajových podmínek v průběhu řešení. Program MSC.MARC (řešič) má vlastní pre & post-processor MSC.MENTAT, který není přímo součástí řešiče MSC.MARC. Jako další plně zaměnitelná a kompatibilní alternativa pre & post-processoru může být použitý také systém MSC.MARC/PATRAN. [17]

Za zmínku stojí také to, že MSC.MARC je odborníky považován již téměř 40. let za světovou špičku v oblasti řešení nelineárních úloh, především v oblasti popisu materiálového chování, úloh velkých deformací (např. tváření, elastomery) a mechanického kontaktu těles. [17]

## 8 MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA

Jak bylo popsáno v kapitole 6.1, pryžové pouzdro se skládá ze dvou různých materiálů:

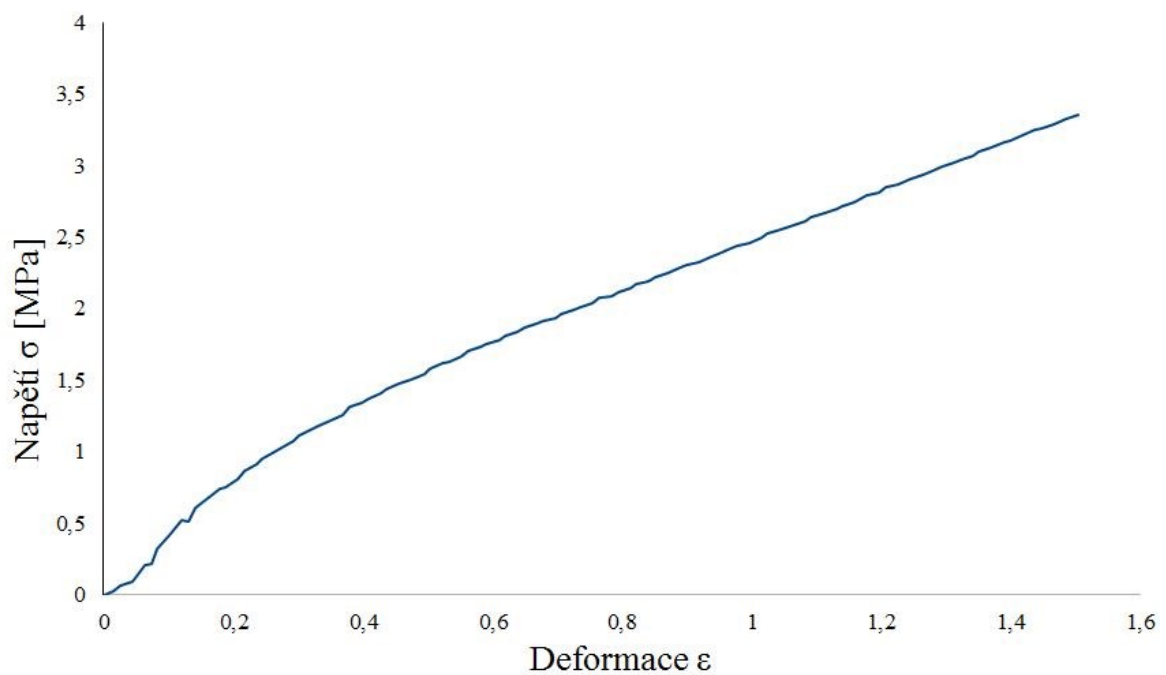
- Pružné pouzdro: NR 60 ± 3 Sh A (51A6028)
- Jádrou pouzdra: EN AW-AlMg3-H46

### 8.1 Pouzdro (51A6028)

#### 8.1.1 Zkouška jednoosým tahem – naměřená data

Výsledkem testu je graf napětí – deformace.

Po předběžné analýze, která ukázala, že by nemělo dojít k větší deformaci než  $\varepsilon = 1,5$ . Proto se pro přesnější matematický popis se uvažuje jen velikost deformace  $\varepsilon = 1,5$  (Obr. 25).

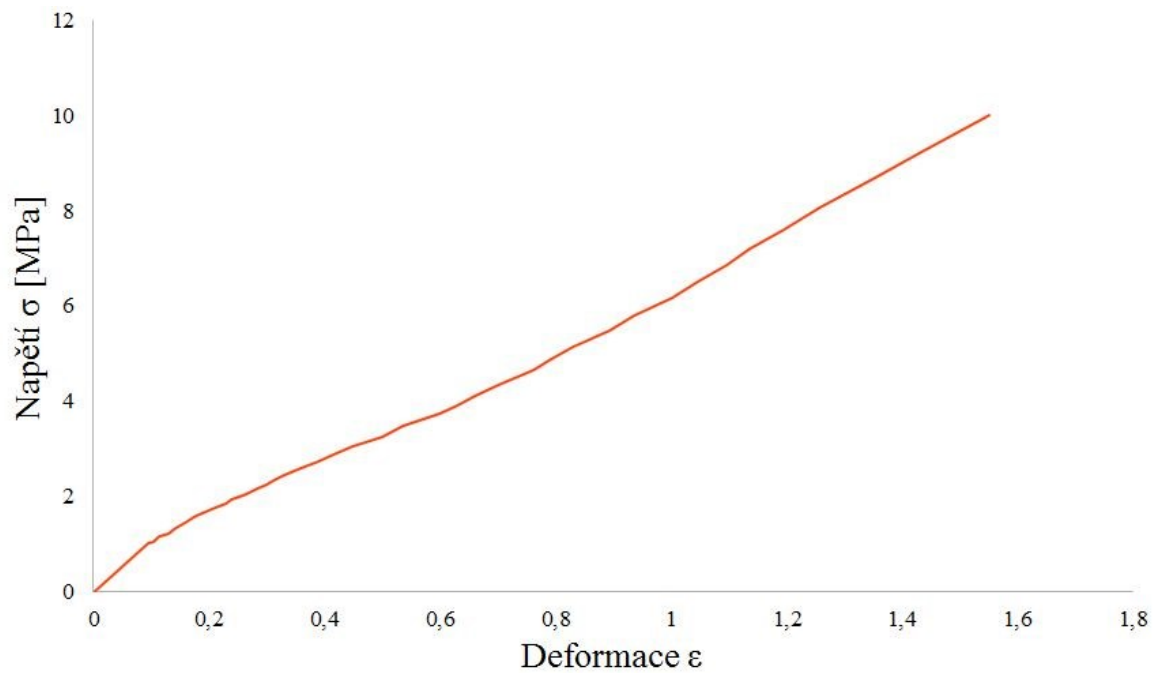


Obr. 25 Závislost napětí - deformaci při jednoosém tahu

### 8.1.2 Zkouška dvouosým tahem – naměřená data

Výsledkem testu je graf napětí – deformace.

Stejně jako u zkoušky jednoosým tahem, se pro přesnější matematický popis uvažuje jen velikost deformace  $\varepsilon = 1,5$  (Obr. 26).

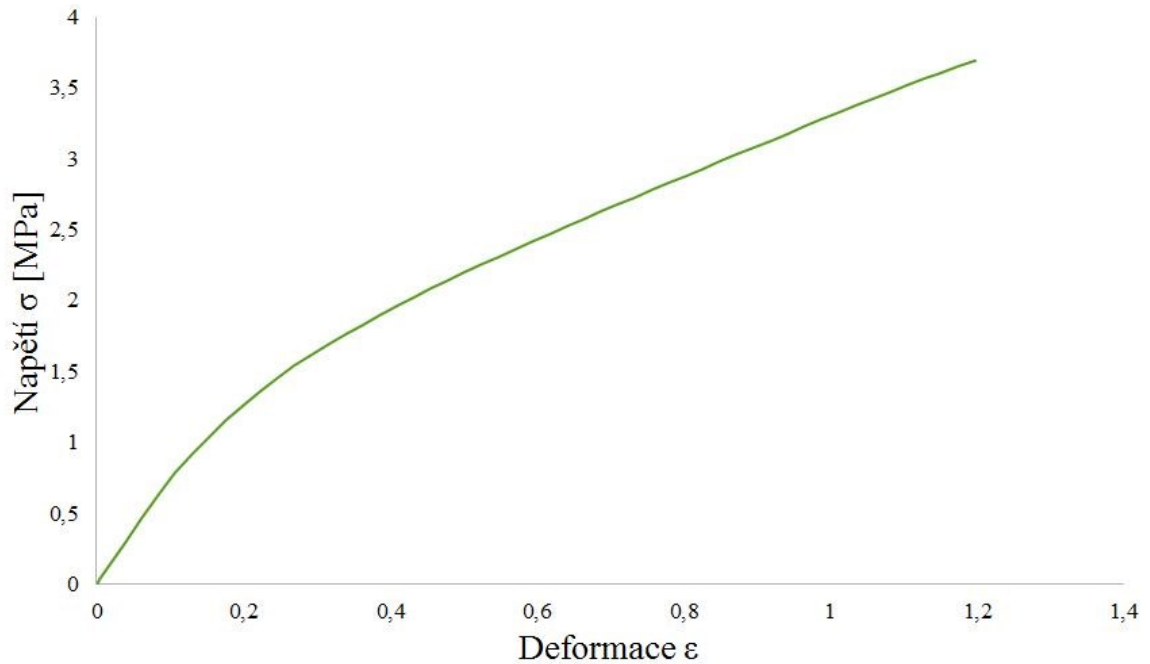


Obr. 26 Závislost napětí - deformaci při dvouosém tahu

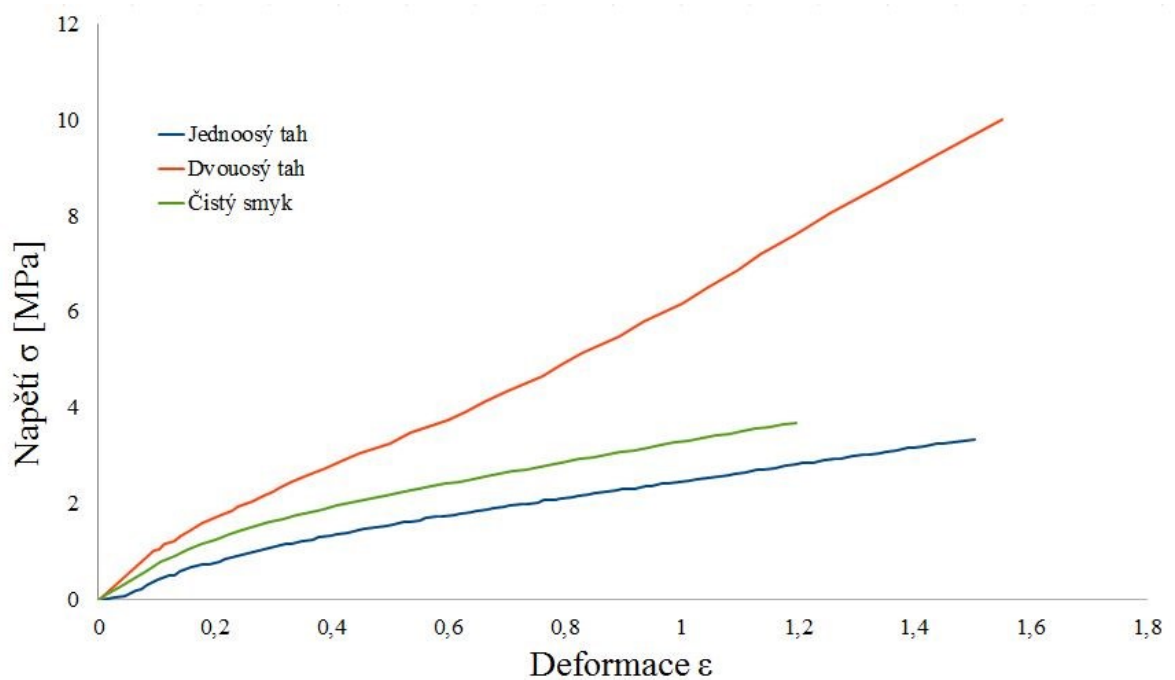
### 8.1.3 Zkouška čistým smykem – naměřená data

Výsledkem testu je opět graf napětí – deformace.

Vzhledem k určitému omezení zkušebního zařízení byla zkouška provedena do velikosti deformace  $\varepsilon = 1,2$  (Obr. 27).



Obr. 27 Závislost napětí - deformaci při čistém smyku



Obr. 28 Srovnání křivek napětí-deformace tří zkoušek

#### 8.1.4 Stanovení materiálových konstant

Při výběru hyperelastického modelu se vycházelo z toho, jak je model schopen proložit jednotlivé experimentem získané křivky napětí-deformace pro různé stavy napjatosti. V praxi je jako nejlepší hyperelastický model pak volen ten, který se co nejvíce blíží naměřeným křivkám napětí-deformace.

K identifikaci materiálových parametrů popisující tvarovou změnu byl využit výpočetní software MSC. Patran.

Vstupem byly naměřené hodnoty napětí a deformace. Tyto hodnoty se postupně zadaly pro jednoosou tahovou zkoušku, dvouosou tahovou zkoušku a zkoušku čistým smykem. Z těchto zadaných dat software vypočítal vždy příslušné konstanty a vypočetl chybu modelu oproti experimentálním zkouškám. Tento postup jsem opakoval pro následující modely:

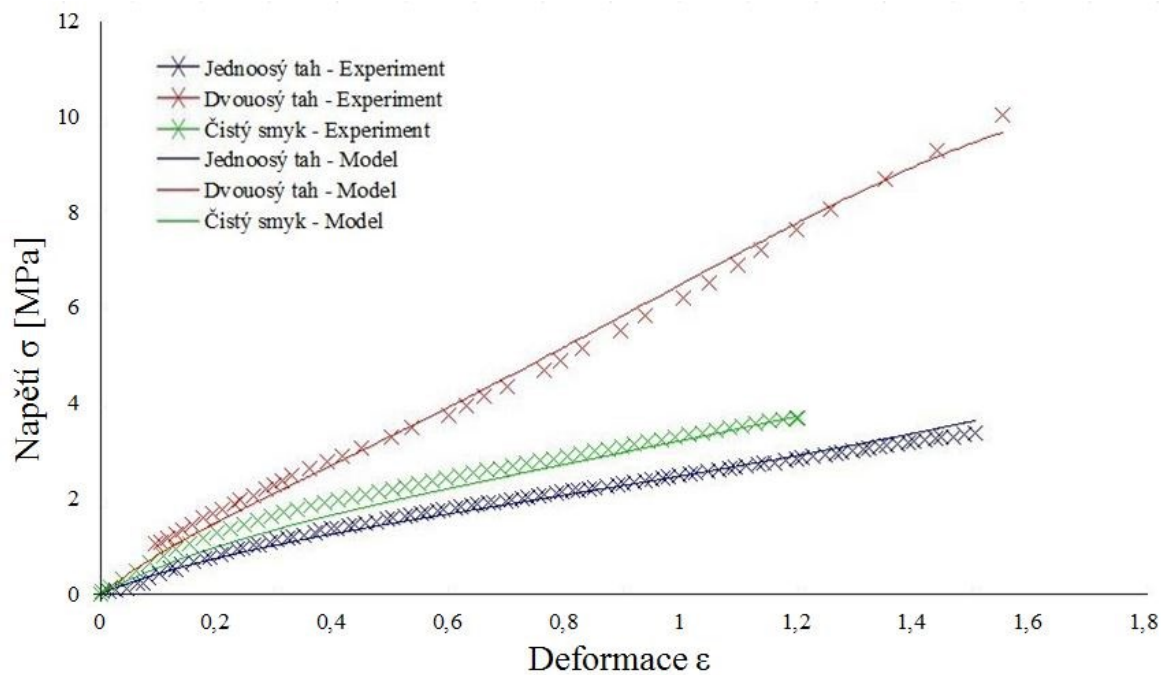
- Neo-Hookean
- Mooney
- Mooney-Rivlin (3 terms)
- Signiorini
- James-Green-Simpson
- 2<sup>nd</sup> Order Invariant
- Yeoh
- Ogden
- Arruda-Boyce
- Gent

Model 2<sup>nd</sup> Order Invariant vykazoval nejmenší chybu s naměřenými experimentálními daty. Proto byl tento model vybrán pro následné analýzy.

Materiálové konstanty dle programu MSC.Patran jsou uvedeny v Tab. č. 2

$C_{10}$	0,45364 Mpa
$C_{01}$	0,32587 Mpa
$C_{11}$	-0,011891 Mpa
$C_{20}$	0,028761 Mpa

Tab. č. 2 Konstanty modelu 2nd Order Invariant



## 8.2 Jádru pouzdra (EN AW-ALMg3-H46)

Jádru pouzdra tvoří hliníkový pásek, který je uvnitř. Materiál jádra je označen jako EN AW-ALMg3-H46. Má následující izotropní mechanické vlastnosti:

Modul pružnosti	$E = 70\,000 \text{ Mpa}$
Poissonovo číslo	$\mu = 0,33$

Tab. č. 3 Materiálové vlastnosti hliníkového jádra

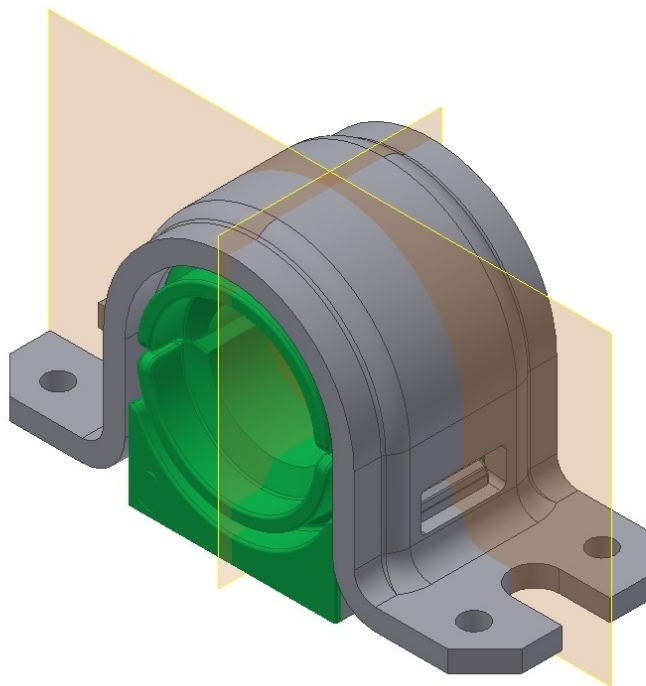


## 9 ANALÝZA

Nastavení analýzy musí co nejvíce odpovídat řešenému problému. Jelikož jsou pouzdra vyrobeny převážně z pryže (hyperealstické vlastnosti), jde o nelineární analýzu. To se projevuje vtláčování tuhé tyče stabilizátoru do pryžových pouzder.

Aby bylo dosaženo modelu, který bude co nejvíce odpovídat realitě, bylo nutné provádět zatížení ve dvou krocích. První krok, označený jako „Montáž“, simuloval nezatížený stav uložení stabilizátoru. Při montáži byla tyč stabilizátoru vtláčována mezi dvě pryžová pouzdra. V pouzdrech tím pádem již vznikalo určité předpětí. Ve druhém kroku, označeném jako „Zatížení“, se simulovala jednotlivá zatížení (axiální, radiální a torzní).

Tvar uložení stabilizátoru umožňoval, v závislosti na druhu zatížení a okrajových podmínkách, zjednodušit numerický model dvěma rovinami symetrie. První rovina byla kolmá k ose stabilizátoru a byla umístěna ve středu pouzdra. Druhá rovina byla rovnoběžná s osou tyče stabilizátoru a zároveň kolmá k první rovině (Obr. 29).



Obr. 29 Roviny symetrie uložení stabilizátoru

Jednotlivé modely měly vždy čtyři části, spodní a horní část pouzdra, tyč stabilizátoru a horní objímku. Pouzdra jsou pryžové díly, které mají hliníkové jádro.

### 9.1 3D analýzy

3D model uložení byl připraven pomocí softwaru Autodesk Inventor 2014. Model byl pomocí symetrie zjednodušen a uspořádán, jako ve stavu před montáží. Takto připravený 3D

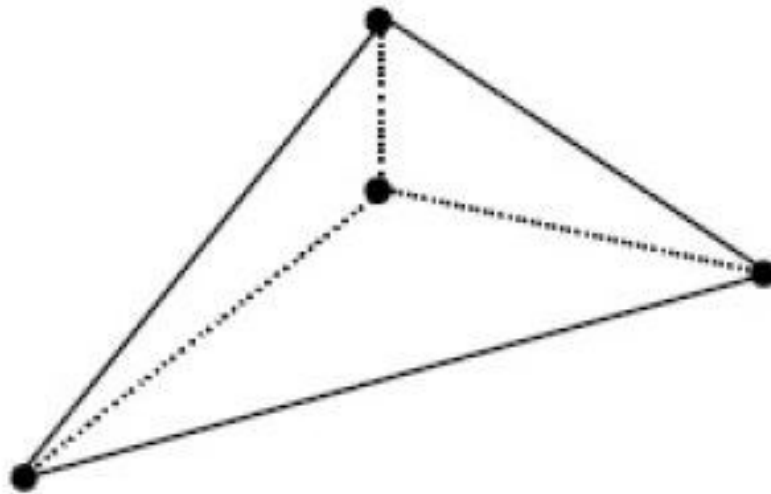
model byl exportován pomocí „stp“ souboru do softwaru MSC. Patran. Po importování dat bylo nutné nastavení délkových jednotek na „mm“

Materiálová charakteristika pryžového pouzdra byla popsána v kapitole 8.1.4 a hliníkového jádra v kapitole 8.2.

Tvorba FEM sítě jedna z nejdůležitějších částí simulace. Množství elementů (hustota sítě) ovlivňuje přesnost a celkový čas simulace. Proto je nutné při tvorbě sítě brát zřetel i na hardwarové možnosti počítače.

Jednotlivé elementy FEM sítě jsou tvořeny geometrickými tvary (úsečka, trojúhelní, čtverec, ...), které se spojují v jednotlivých bodech (Nod). Jejich vzájemným propojením vznikne FEM síť.

Ve 3D modelech byla použita pro pryžová pouzdra a jejich hliníkové jádra metoda tvorby FEM sítě „TetMesch“, jednotlivé elementy tzv. „Tet4“. Elementy mají tvar čtyřstěnu, tzv. tetrahedron.



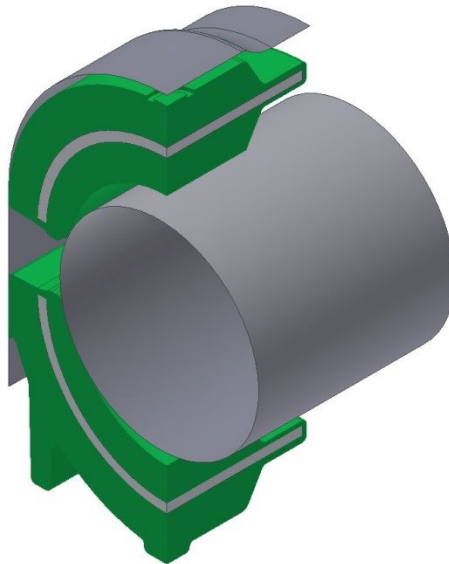
Obr. 30 Typ elementu – tetrahedron [16]

Tyč stabilizátoru a horní objímka byly tvořeny jako jednoduchá plošná tělesa (Surface). Deformované pryžové pouzdro, které mělo společné plochy s hliníkovým jádrem, bylo vytvořeno jako jedno prostorové těleso (Solid).

## 9.1.1 Radiální zatížení

### 9.1.1.1 Geometrie modelu

Pro zjednodušení modelu se využilo symetrie pomocí roviny kolmé k ose tyče i pomocí roviny rovnoběžné s osou tyče. Vznikl čtvrtinový 3D model (Obr. 31).

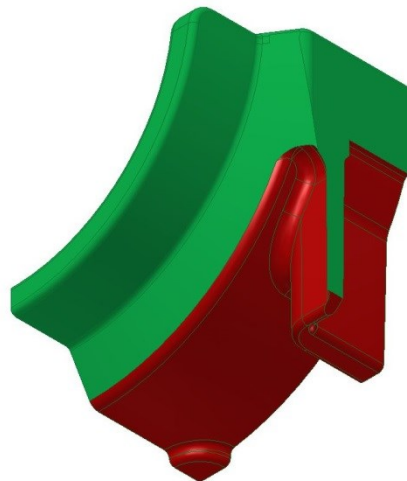


Obr. 31 Model pro radiální zatížení

### 9.1.1.2 Zatížení a okrajové podmínky

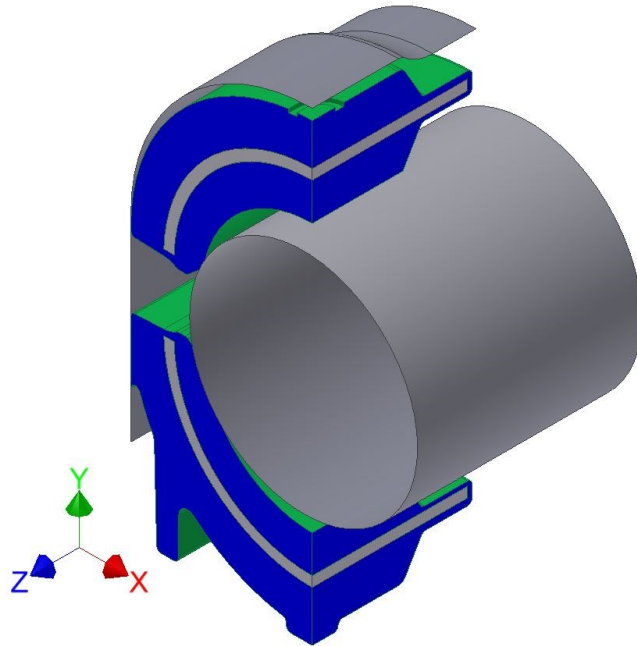
#### *První krok:*

Pevná část, kde byly definovány všechny tři stupně volnosti, byla zvolena na spodním pryžovém uložení (viz Obr. 32 červená plocha).



Obr. 32 Plocha (červená) s nulovým posunutím radiálního zatížení

Zjednodušení modelu, čili symetrie, byla definována dle plochy kolmé k ose a rovnoběžné s osou tyče stabilizátoru (viz Obr. 31). Na těchto rovinách byly definovány 2 stupně volnosti (osa X a Z viz Obr. 33). Třetí stupeň nebyl definován, tudíž umožňoval volný posuv (osa Y viz Obr. 33)



Obr. 33 Orientace os a plochy symetrie (modré) radiálního zatížení

Deformovatelná tělesa byly definovány horní a dolní pryžové pouzdro. Kontakt vznikl mezi pouzdry samotnými, mezi pouzdry a tyčí stabilizátoru a mezi pouzdry, základnou a horní objímkou.

Montáž probíhala tak, že horní objímka se posunovala směrem dolů proti základně. Během pohybu tlačila objímka horní pouzdro na tyč stabilizátor. Tyč, objímka i obě pouzdra se mohly pohybovat jen v ose Y. Po dokončení montáže se tyč vtlačila do obou pouzder.

#### ***Druhý krok:***

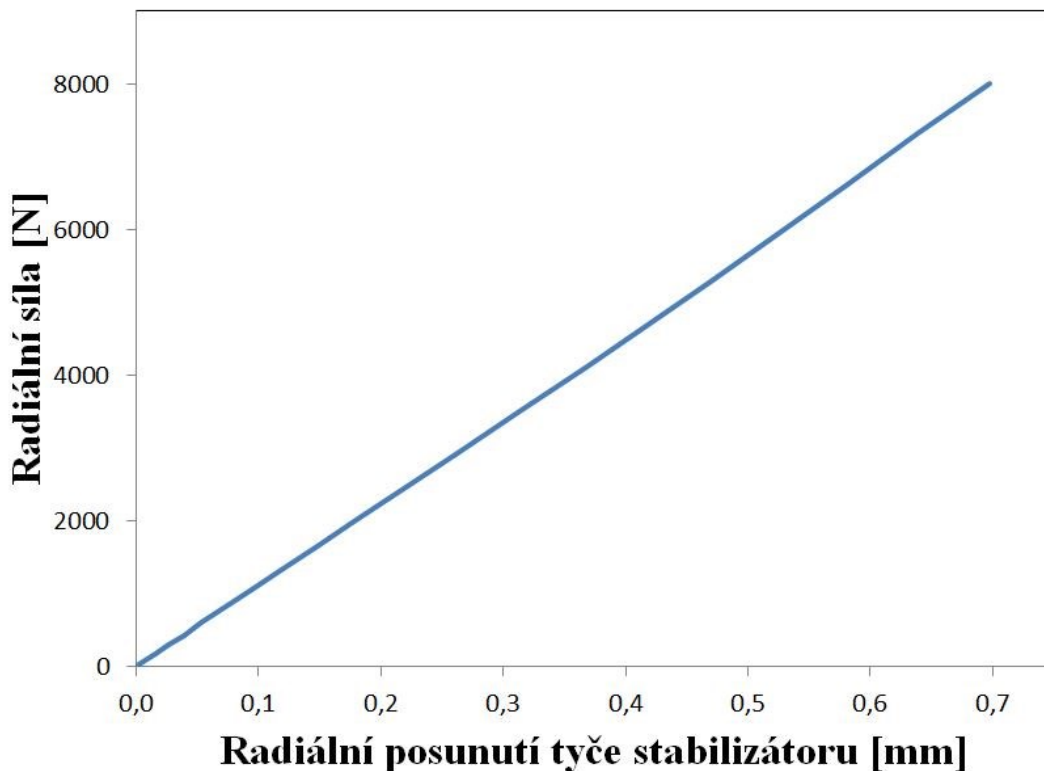
Kontakt mezi pouzdry a tyčí stabilizátoru byl definován jako „glue“. To znamená, že měly mezi sebou pevný kontakt po celou dobu druhého kroku.

Tyč stabilizátoru byla zatěžována radiální silou 2 000 N (ve směru osy Y).

Horní objímka a základna zůstaly ve stejné pozici jako na konci kroku jedna. Během kroku dva svou pozici nezměnily.

### 9.1.1.3 Výsledky

Hlavním výsledkem je radiální tuhost pouzdra. Z výsledku analýzy byl sestaven graf "zatížení - posunutí" (Obr. 34). Tuhost byla stanovena z rozmezí od 1 000 do 2 000 N (stejně jako v reálném testu uložení). Konečná hodnota radiální tuhosti modelu je 11 168 N / mm. Průměrná hodnota naměřená reálným testem byla 11 190 N/mm.

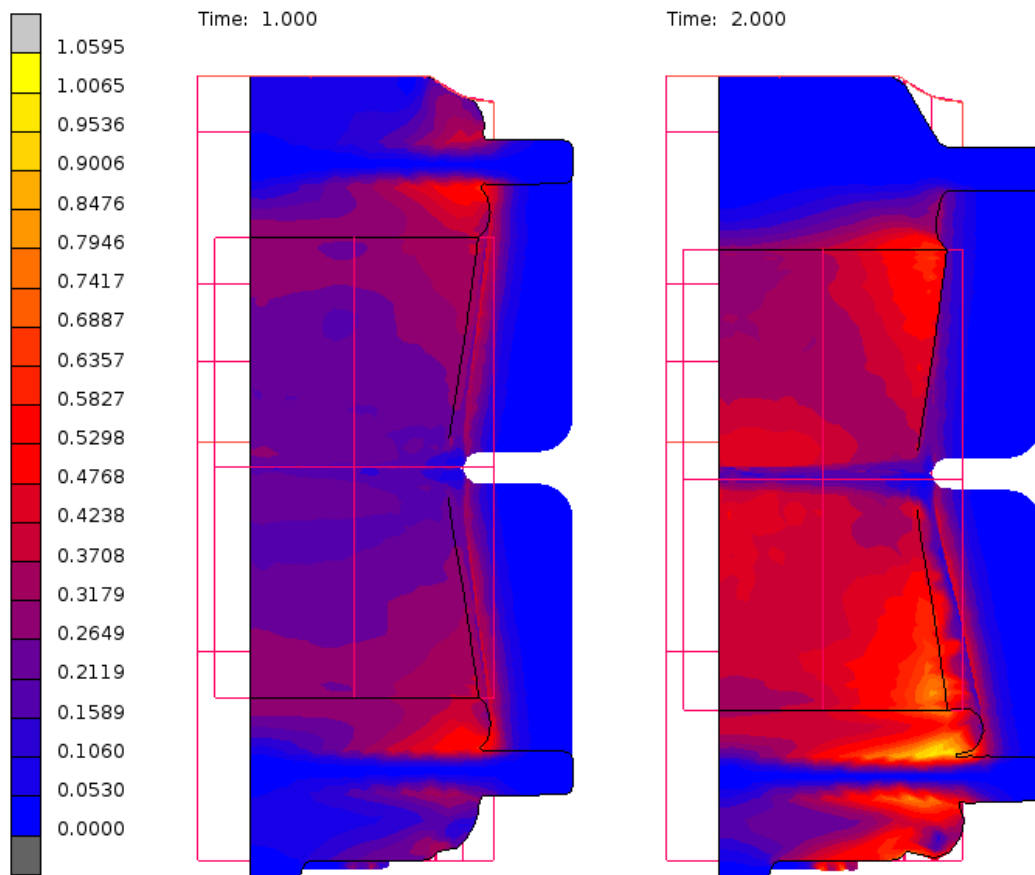


Obr. 34 Graf „zatížení – posunutí“ radiálního zatížení

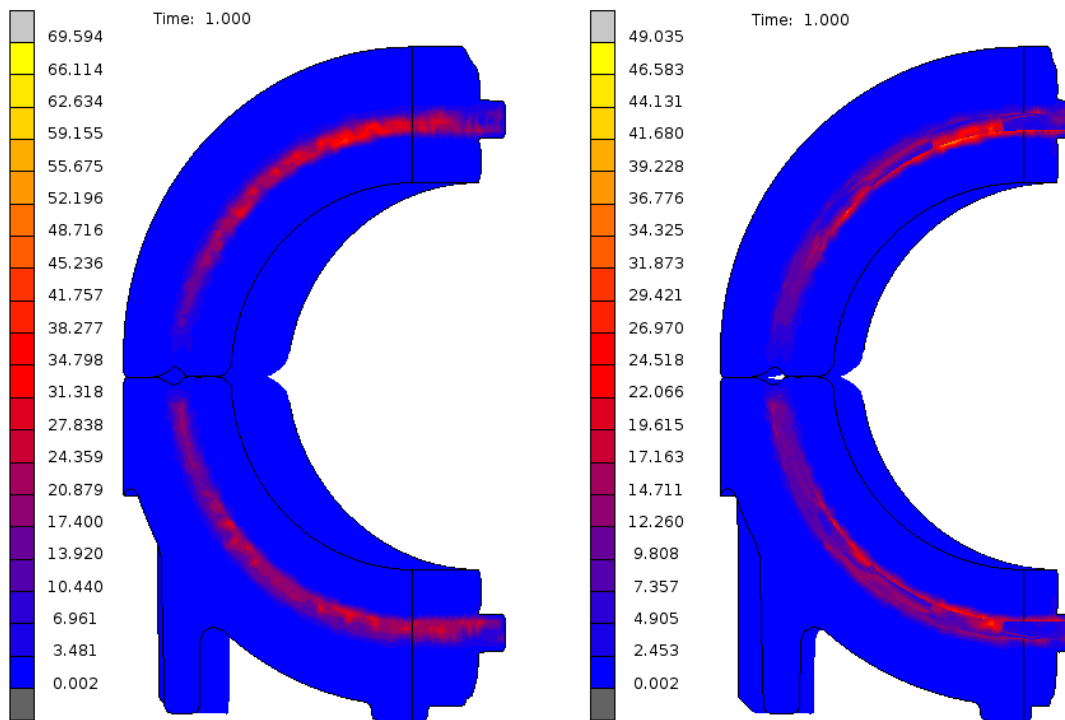
Na Obr. 35 je zobrazeno poměrné přetvoření Von Mises. Na první části obrázku je zobrazena poměrné přetvoření pouzdra na konci prvního kroku zatížení (čas = 1,0). Konečné poměrné přetvoření po radiálním zatížení na konci kroku dva (čas = 2,0) je zobrazeno na druhé části obrázku. Bod s maximálním ekvivalentním přetvořením  $\varepsilon = 1,06$  je na konci druhého kroku (max. na konci prvního kroku je  $\varepsilon = 0,71$ ).

Na rozdíl od poměrného přetvoření, rozložení napětí je naprosto odlišné. Napětí je soustředěno v hliníkovém jádru a v jeho okolí (Obr. 36 a Obr. 37). Levá část obrázku zobrazuje napětí v jádru, pravá část zobrazuje napětí v pryžové části pouzdra. Na Obr. 36 je zobrazeno napětí na konci kroku jedna, Obr. 37 na konci kroku dva. Extrémní napětí v pryžové části jsou koncentrována v místech děr jádra. Hodnoty napětí jsou velmi vysoké již na konci prvního kroku zatížení (čas = 1,0). Důvodem je to, že se elastomer v průběhu zatíže-

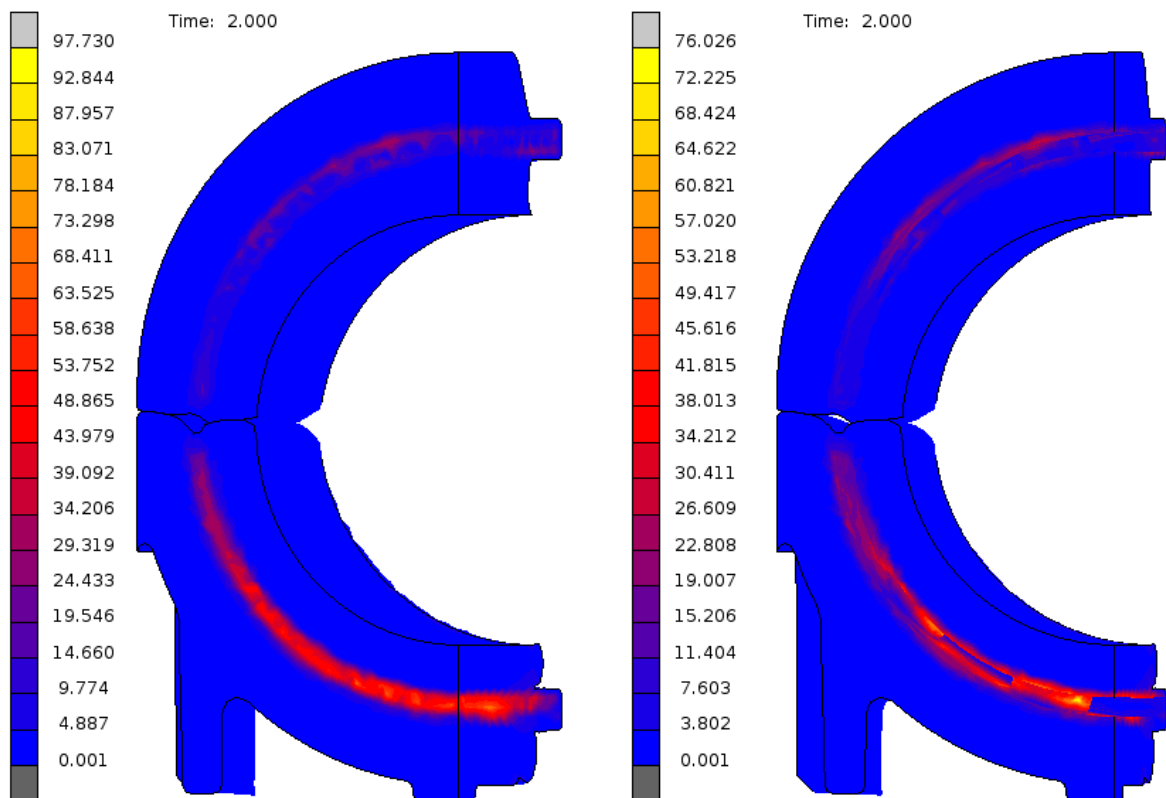
ní nemá kde roztahovat (je uzavřena v díře jádra). Podobná situace se vyskytuje na povrchu jádra, kde je deformace elastomeru omezena hliníkovým jádrem.



Obr. 35 Poměrné přetvoření Von Mises - Radiální zatížení



Obr. 36 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Radiální zatížení – čas 1,0



Obr. 37 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Radiální zatížení – čas 2,0

#### 9.1.1.4 Statistika analýzy

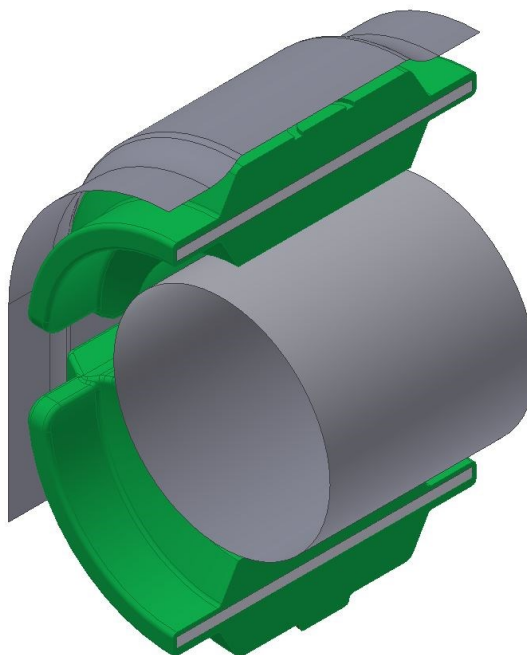
Počet uzlů	28 950
Počet prvků	148 402
Průměrná velikost prvku	0,7 mm
Symetrie modelu	1/4
Aplikovaná zatížení	2 000 N (8 000 N)
Počet vypočítaných přírůstků - celkem	92
Počet vypočítaných přírůstků - první krok zatížení	72
Počet vypočítaných přírůstků - druhý krok zatížení	20
Maximální poměrné přetvoření elastomeru	1,06
Maximální napětí elastomeru	76 Mpa
Maximální napětí jádra	98 Mpa
Radiální tuhost pouzdra	11 168 N/mm

Tab. č. 4 Statistika analýzy radiálního zatížení

#### 9.1.2 Axiální zatížení

##### 9.1.2.1 Geometrie modelu

Pokud jde o axiální zatížení, použila se pouze symetrie pomocí roviny rovnoběžné s osou tyče stabilizátoru. Vznikl tedy poloviční 3D model (Obr. 38).

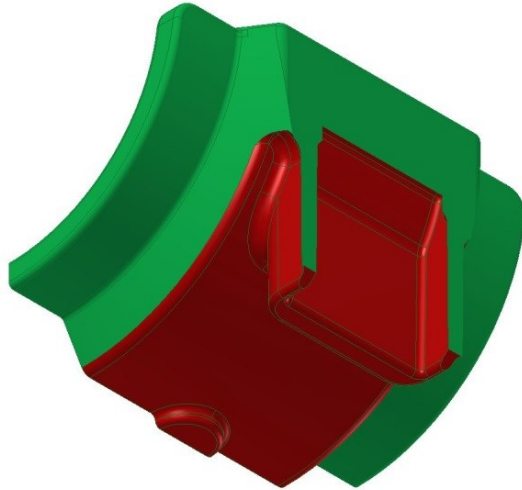


Obr. 38 Model pro axiální zatížení



### 9.1.2.2 Zatížení a okrajové podmínky

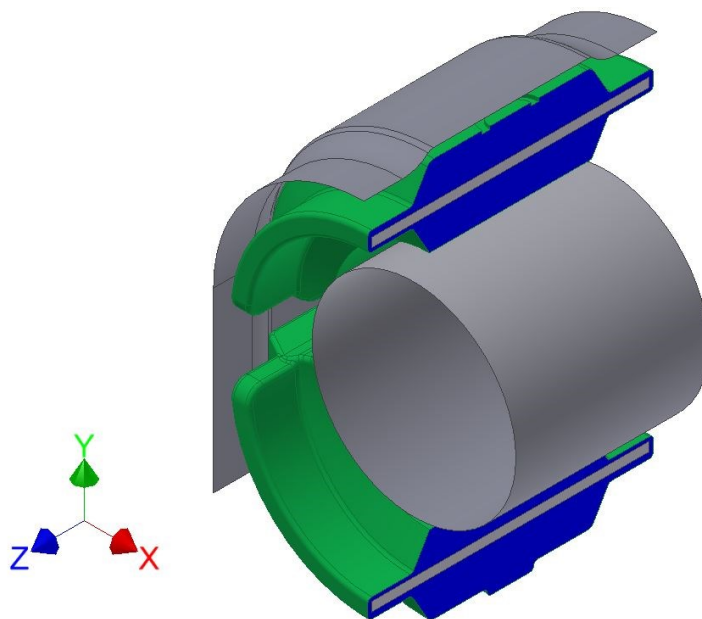
Všechny stupně volnosti posunutí byly omezeny na stejných plochách, jako v případě radiální modelu (viz Obr. 39 červená plocha).



Obr. 39 Plocha (červená) s nulovým posunutím axiálního zatížení

Symetrie, čili nulové posunutí v ose X, byla definována na modré plochy viz Obr. 40. Opět platí, že se zatížení aplikovalo ve dvou krocích, které byly podobné jako u radiální modelu. Montáž probíhala stejně, tak jak je popsáno v kapitole 9.1.1.2.

Na začátku druhého kroku zatížení, byla tyč stabilizátoru zatížena axiální silou  $F = 800 \text{ N}$  (ve směru osy Z). Kontakt mezi pryžovými pouzdry a tyčí stabilizátoru byl definován „glue“

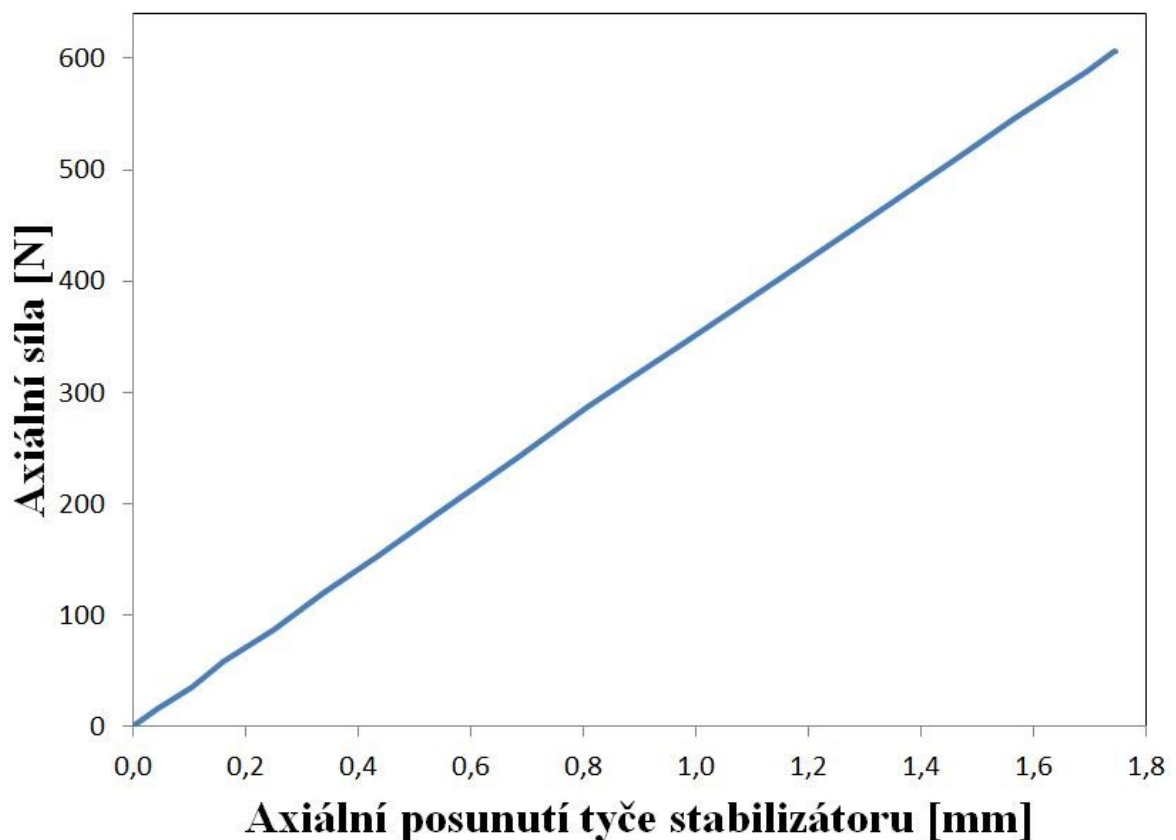


Obr. 40 Orientace os a plochy symetrie (modré) axiálního zatížení

### 9.1.2.3 Výsledky

Při tomto typu zatížení došlo k situaci, kdy pouzdro vyklouzlo z horní objímky. Stalo se to v době čas = 1,379. To odpovídá zatížení 37,9% , které je 303 N. Celkově tedy 606 N. V tomto čase byla analýza ukončena.

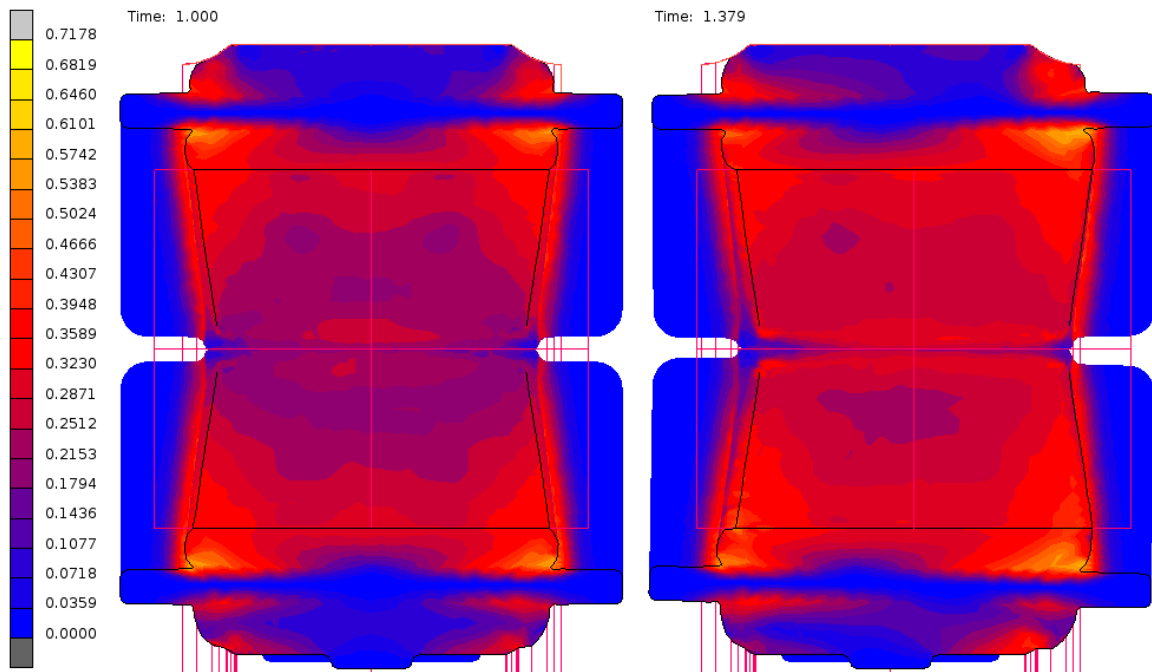
Graf závislosti " Zatížení - posunutí" vidíme na Obr. 41. Tuhost byla stanovena z rozsahu zatěžující síly 450 N až 606 N (v reálném testu je rozsah 450 N až 650 N). Konečná hodnota axiální tuhosti modelu je 340 N / mm. Průměrná hodnota z reálných testů byla naměřena 332 N/mm.



Obr. 41 Graf „zatížení – posunutí“ axiálního zatížení

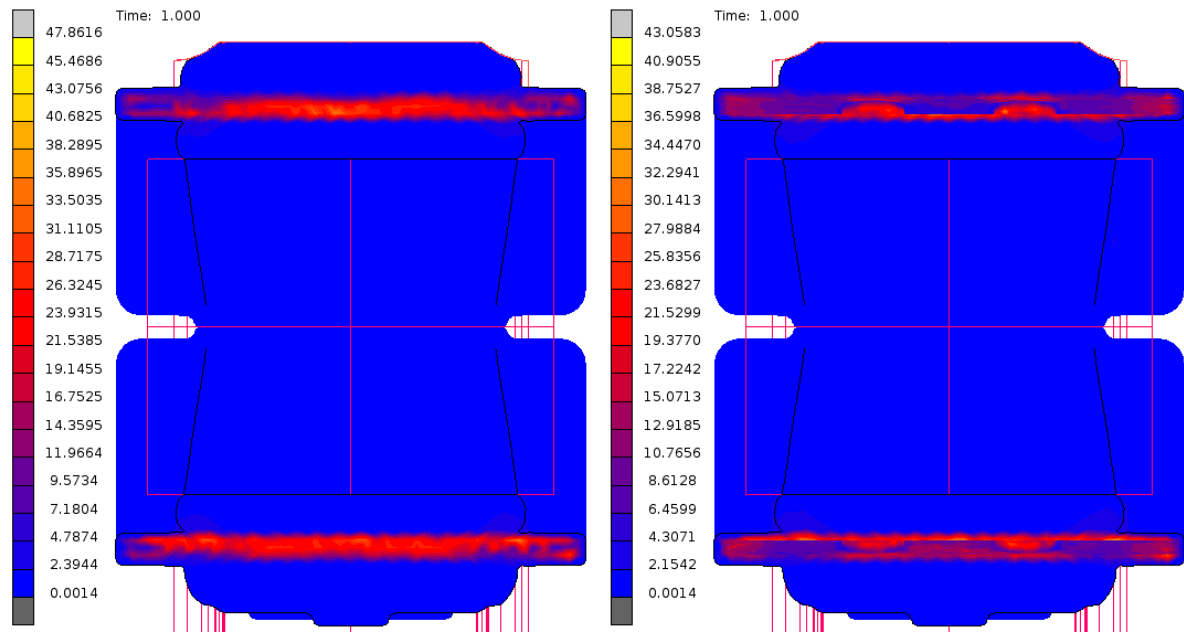
Poměrné přetvoření Von Mises, na konci prvního (čas = 1,000) a druhého kroku zatížení (čas = 1,379), je znázorněno na Obr. 42. Na konci montáže, v čase = 1,0, by hodnota poměrného přetvoření měla odpovídat radiálnímu modelu v čase = 1,0. Je zde však malý rozdíl v hodnotě maximálního poměrného přetvoření na konci prvního kroku. V axiálním modelu to je  $\varepsilon = 0,63$  a pro srovnání v radiálním modelu je  $\varepsilon = 0,71$ . Jak můžeme vidět na Obr. 35 a Obr. 42, rozdělení napětí je stejné. Důvodem rozdílů může být různá velikost konečně-prvkového elementu. Vzhledem k větší velikosti modelu (poloviční model) axiál-

ního zatížení, musely být použity větší elementy (viz Tab. č. 5). Konečná hodnota maximálního posunutí (čas = 1,379), se změnila jen nepatrně (na rozdíl od radiálního modelu) na hodnotu  $\varepsilon = 0,72$ .

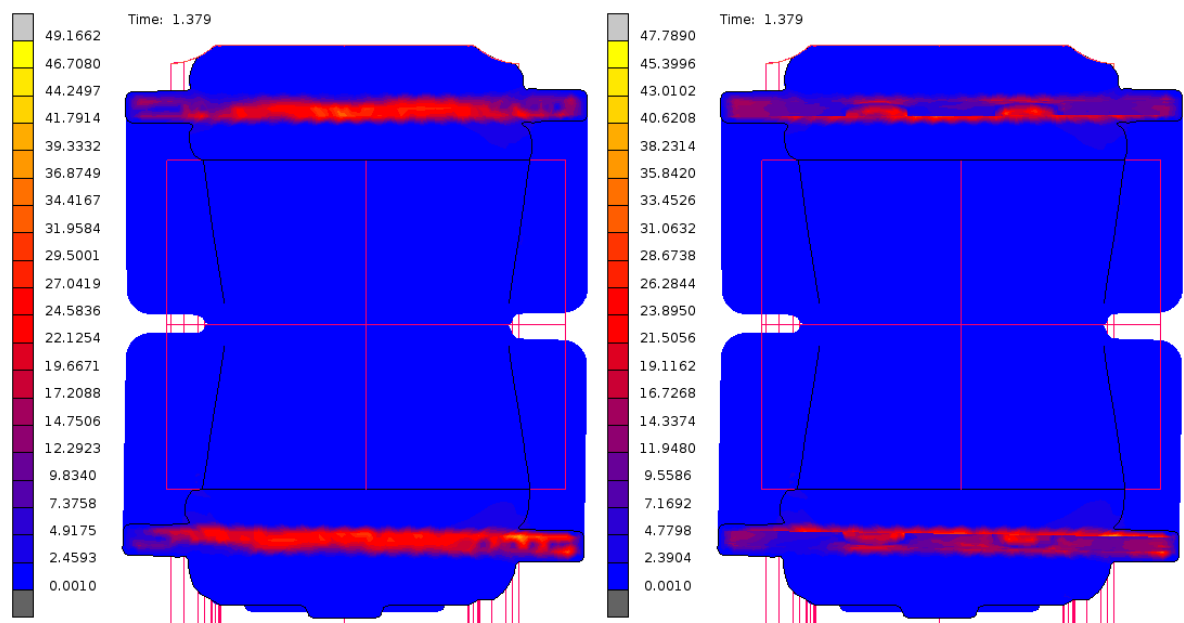


Obr. 42 Poměrné přetvoření Von Mises - Axální zatížení

Na Obr. 43 a Obr. 44 můžeme vidět, že napětí, stejně jako i poměrné přetvoření, nemá výrazné odchylky mezi koncem prvního kroku analýzy (čas = 1,0) a koncem druhého kroku analýzy (čas = 1,379). Napětí i poměrné přetvoření v čase čas = 1,0 by měly být stejné jako v radiálním modelu. To platí v případě elastomeru. V jádru je evidentní rozdíl, který může být opět způsoben rozdílnou velikostí konečně-prvkového elementu, a také tím, že napětí se koncentruje na malé plochy ostrých hran jádra (hodnoty napětí hliníkového jádra jsou stále velmi nízké, proto se tento rozdíl podrobněji nezkoumal). Stejně jako v případě radiálního zatížení, napětí jsou soustředěny v blízkosti povrchu hliníkového jádra.



Obr. 43 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,0



Obr. 44 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,379

### 9.1.2.4 Statistika analýzy

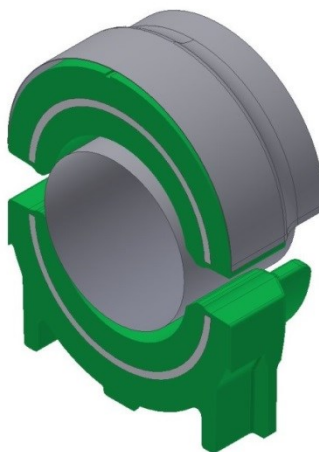
Počet uzlů	41 860
Počet prvků	213 529
Průměrná velikost prvku	0,8 mm
Symetrie modelu	1/2
Aplikovaná zatížení	303 N (606 N)
Počet vypočítaných přírůstků - celkem	95
Počet vypočítaných přírůstků - první krok zatížení	75
Počet vypočítaných přírůstků - druhý krok zatížení	20
Maximální poměrné přetvoření elastomeru	0,72
Maximální napětí elastomeru	48 Mpa
Maximální napětí jádra	49 Mpa
Axiální tuhost pouzdra	340 N/mm

Tab. č. 5 Statistika analýzy axiálního zatížení

### 9.1.3 Torzní zatížení

#### 9.1.3.1 Geometrie modelu

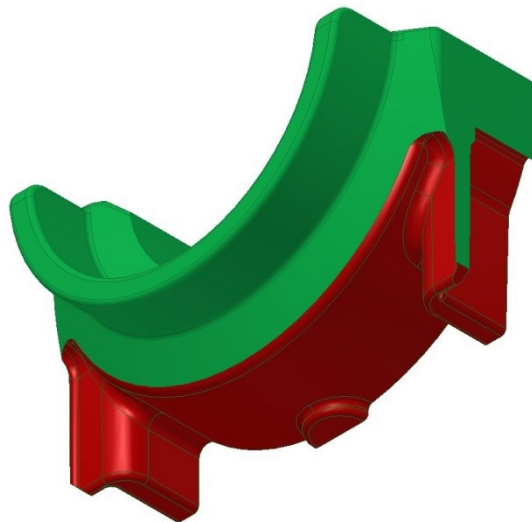
Pro torzní model byla použita symetrie pomocí roviny kolmé k ose tyče stabilizátoru (viz Obr. 45). Horní objímka byla pro tento výpočet zjednodušena. Zůstala jen zaoblená část objímky, rovné svislé plochy byly odstraněny (viz Obr. 38 nebo Obr. 45). Tyto plochy měly být ve styku s dolní částí pryžového pouzdra. Tento kontakt ale způsoboval v průběhu výpočtu vážné problémy. Z tohoto důvodu musel být kontakt u modelu odstraněn. Očekává se menší vliv této změny na konečnou torzní tuhost pouzdra.



Obr. 45 Model pro torzní zatížení

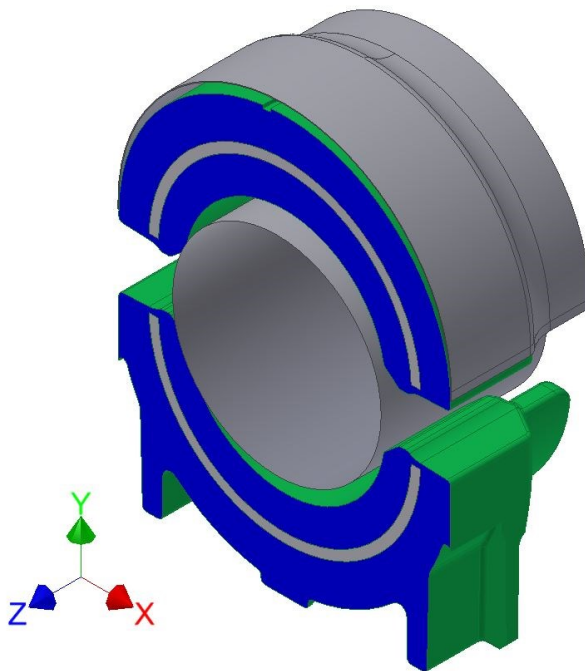
### 9.1.3.2 Zatížení a okrajové podmínky

Pevná část, kde byly definovány všechny tři stupně volnosti, byla zvolena na spodním pryžovém uložení (viz Obr. 46 červená plocha). Na této ploše byl ještě definován posuv pro první krok modelu.



Obr. 46 Plocha (červená) s nulovým posunutím torzního zatížení

Zjednodušení modelu, čili symetrie, byla definována dle plochy kolmé k ose tyče stabilizátoru (Obr. 51).



Obr. 47 Orientace os a plochy symetrie (modré) torzního zatížení

Stejně jako v obou předchozích případech, zatížení bylo aplikováno ve dvou krocích. V prvním kroku, proběhla montáž pouzder na tyč stabilizátoru. Na rozdíl od předchozích modelů se tyč stabilizátoru nepohybovala, nýbrž obě pouzdra proti tyči stabilizátoru.

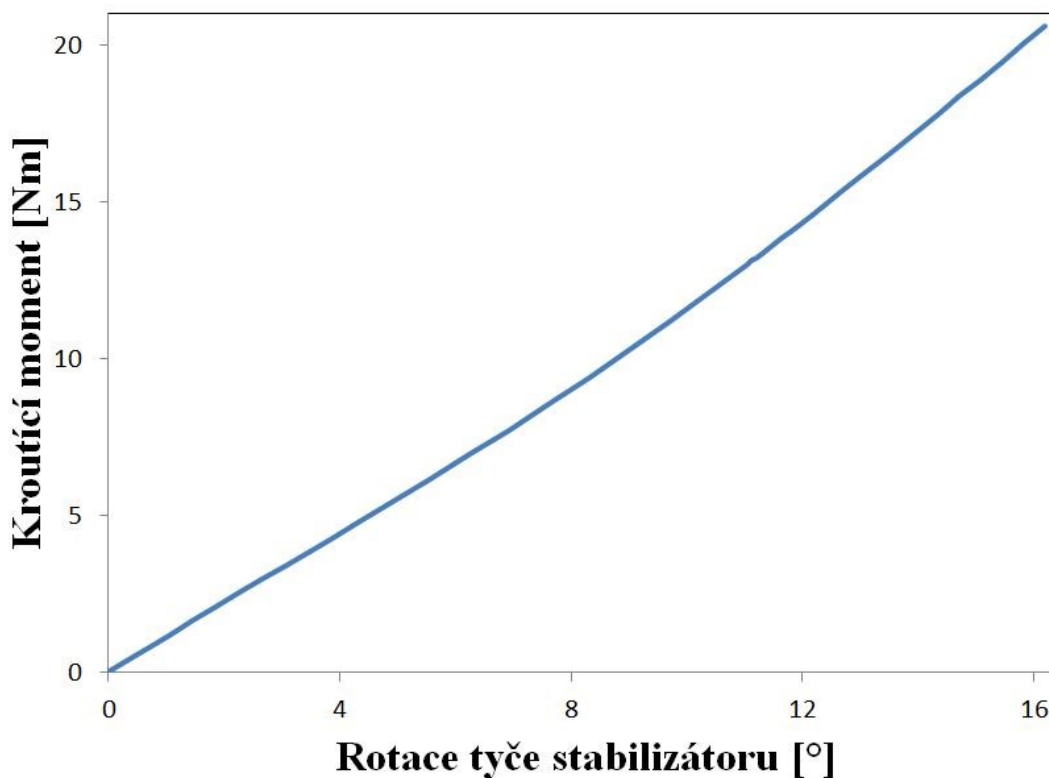
Kontakt „glue“ byl definován mezi pryžové díly a tyč stabilizátoru na začátku druhého kroku zatížení. Kontakt mezi objímkou a horním pouzdrém byl odstraněn. Opět je to z důvodu problémů při výpočtu. V kroku dva se aplikovala rotace stabilizátoru  $\varphi = 0,4 \text{ rad}$  ( $23^\circ$ ).

### 9.1.3.3 Výsledky

Analýza byla ukončena v čase = 1,714, kdy se tyč stabilizátoru otáčí o  $\varphi = 16,4^\circ$ . V tomto bodě nebyl model schopen zvládnout větší deformace (viz Obr. 49).

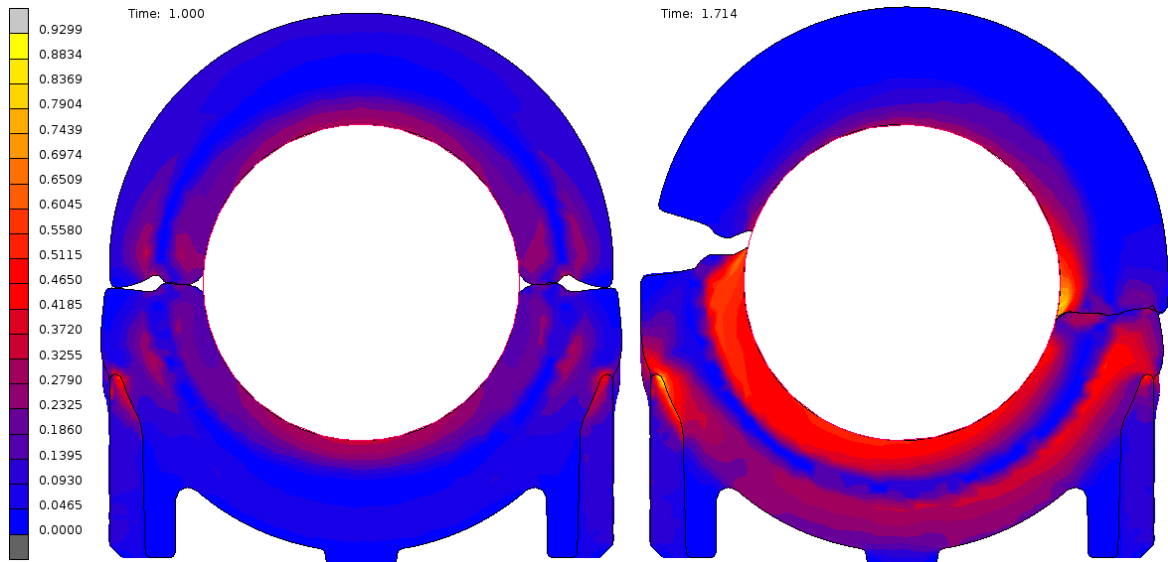
Graf závislosti „Zatížení – rotace“ vidíme na Obr. 48. Výsledná křivka není tak lineární jako u předchozích dvou analýz (Obr. 34 a Obr. 41).

Tuhost byla stanovena z rozmezí  $0,5^\circ$  až  $5,0^\circ$  (stejně jak v reálném testu). Konečná hodnota tuhosti zkroucení modelu je  $1,11 \text{ Nm}^\circ$ . Průměrná hodnota z reálných testů byla naměřena  $1,02 \text{ Nm}^\circ$ .



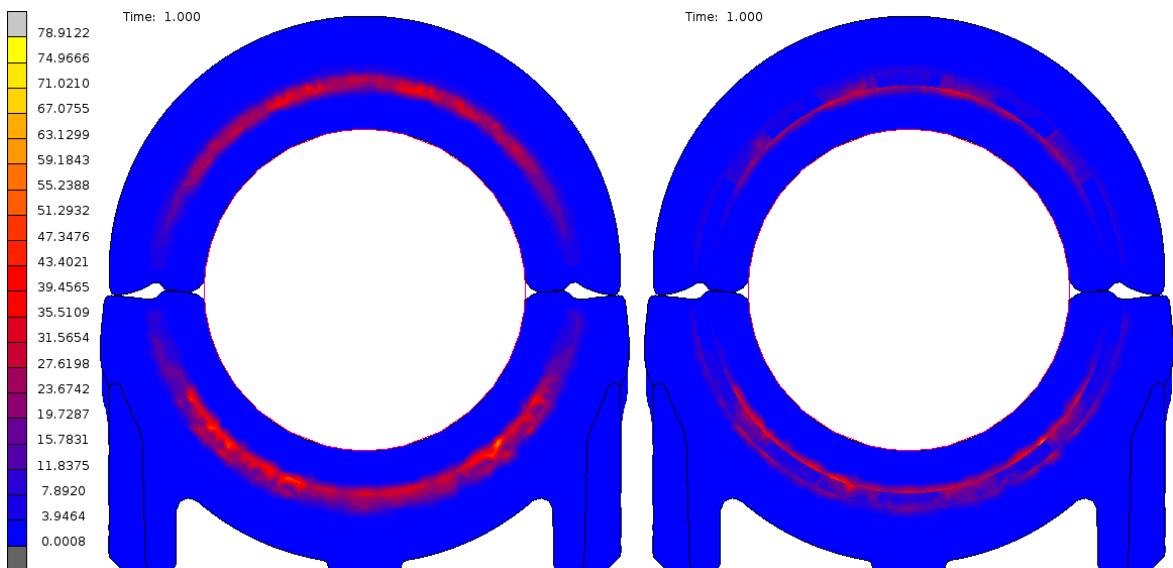
Obr. 48 Graf „zatížení – rotace“ torzního zatížení

Maximální poměrné přetvoření na konci prvního kroku  $\varepsilon = 0,62$ , je opět velmi podobné jako u předchozích modelů. Maximální poměrné přetvoření na konci analýzy je  $\varepsilon = 0,93$  (viz obr. 24).



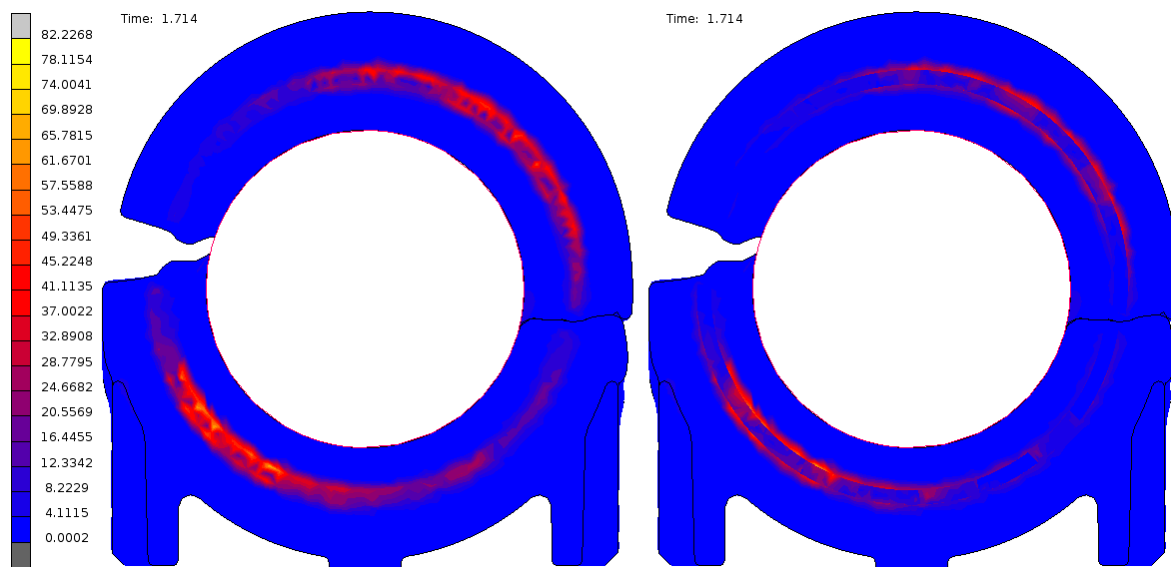
Obr. 49 Poměrné přetvoření Von Mises - Torzní zatížení

Na rozdíl od dvou předchozích modelů, maximálně napětí je stejné pro pryžové pouzdro i pro hliníkové jádro. Tato situace nastane v čase = 1,0, a také na konci analýzy. To znamená, že se maximální napětí v obou případech nachází na povrchu jádra, čili na ploše, kterou sdílí pouzdro i jádro společně (viz Obr. 50 a Obr. 51 model bez zobrazeného jádra).



Obr. 50 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Torzní zatížení – čas 1,0





Obr. 51 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Torzní zatížení – čas 1,714

#### 9.1.3.4 Statistika analýzy

Počet uzlů	34 142
Počet prvků	167 914
Průměrná velikost prvku	0,8 mm
Symetrie modelu	1/2
Aplikovaná zatížení	10,42 Nm (20,85 Nm)
Počet vypočítaných přírůstků - celkem	99
Počet vypočítaných přírůstků - první krok zatížení	53
Počet vypočítaných přírůstků - druhý krok zatížení	46
Maximální poměrné přetvoření elastomeru	0,93
Maximální napětí elastomeru	82 Mpa
Maximální napětí jádra	82 MPa
Torzní tuhost pouzdra	1,11 Nm/°

Tab. č. 6 Statistika analýzy torzního zatížení

## 9.2 2D analýzy

2D analýzy se použily pro zjednodušení výpočetních modelů. Využilo se u nich buď osové symetrie, nebo společného rozměru v jednom směru, délky kontaktu mezi tyčí stabilizátoru a pryžového pouzdra. To činilo 21 mm

Zjednodušený 2D výkres uložení ve stavu před montáží byl připraven pomocí softwaru AutoCAD Mechanical 2014. Následný export a import dat do souboru softwaru

MSC.Patran proběhl pomocí „igs“ souboru. Poté se v programu MSC.Patran jednotlivé entyty spojily do kontinuální křivky (znázorňující objímku a tyč stabilizátoru). Z uzavřených křivek se vytvořily plochy (znázorňující pryžové pouzdro a hliníkové jádro).

FEM síť pryžového pouzdra a hliníkového jádra byla tvořena metodou „Hybrid“, jednotlivé elementy tzv. „Triat3“. Elementy mají tvar obecného trojúhelníku.

Tyč stabilizátoru a horní objímka byly definovány jako jednotlivá tuhá tělesa, tzn. pro 2D analýzu křivky (Curve). Pryžové pouzdro a hliníkové jádro byly definovány jako plochy (Surface), které mají na svých hranicích společné uzly.

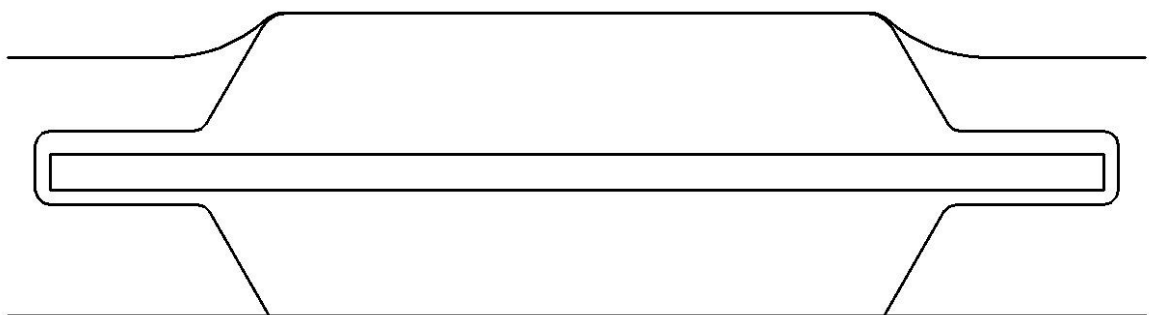
## 9.2.1 Axiální zatížení

### 9.2.1.1 Geometrie modelu

Pro 2D analýzu axiálního zatížení se využila osová souměrnost uložení stabilizátoru. Po zjednodušení modelu vzniklo jedno kruhové pryžové pouzdro, které má rovněž kruhové hliníkové jádro.

Na Obr. 52 je znázorněn řez zjednodušené situace.

Hliníkové jádro se chovalo jako nedeformovatelná součást, či-li mělo konstantní průměr. Deformovalo se jen pryžové pouzdro, na něhož z horní plochy tlačila objímka (posunovala se směrem dolů, do montážní polohy) a na dolní plochu tlačila tyč stabilizátoru (posunovala se směrem vzhůru, do polohy, která odpovídá průměru tyče stabilizátoru).



Obr. 52 Model pro axiální zatížení

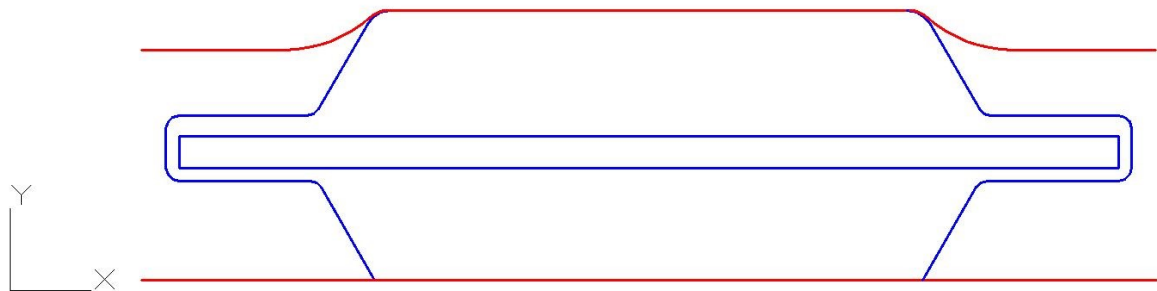
### 9.2.1.2 Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti řešené 2D analýzy byly nastaveny tak, aby odpovídali axisymetrickým objektům typu „2D Solid“. Konkrétně pro pryžové pouzdro „Hybrid(Herrmann)/Red.Int.“ a pro hliníkové jádro „Standart Formulation“.

Konkrétní materiálové konstanty byly již popsány v kapitolách 8.1.4 a 8.2.

### 9.2.1.3 Zatížení a okrajové podmínky

Tak jako v případě 3D modelů, i 2D modely byly rozděleny do dvou kroků.



Obr. 53 2D model s vyznačenými plochami a křivkami axiálního zatížení

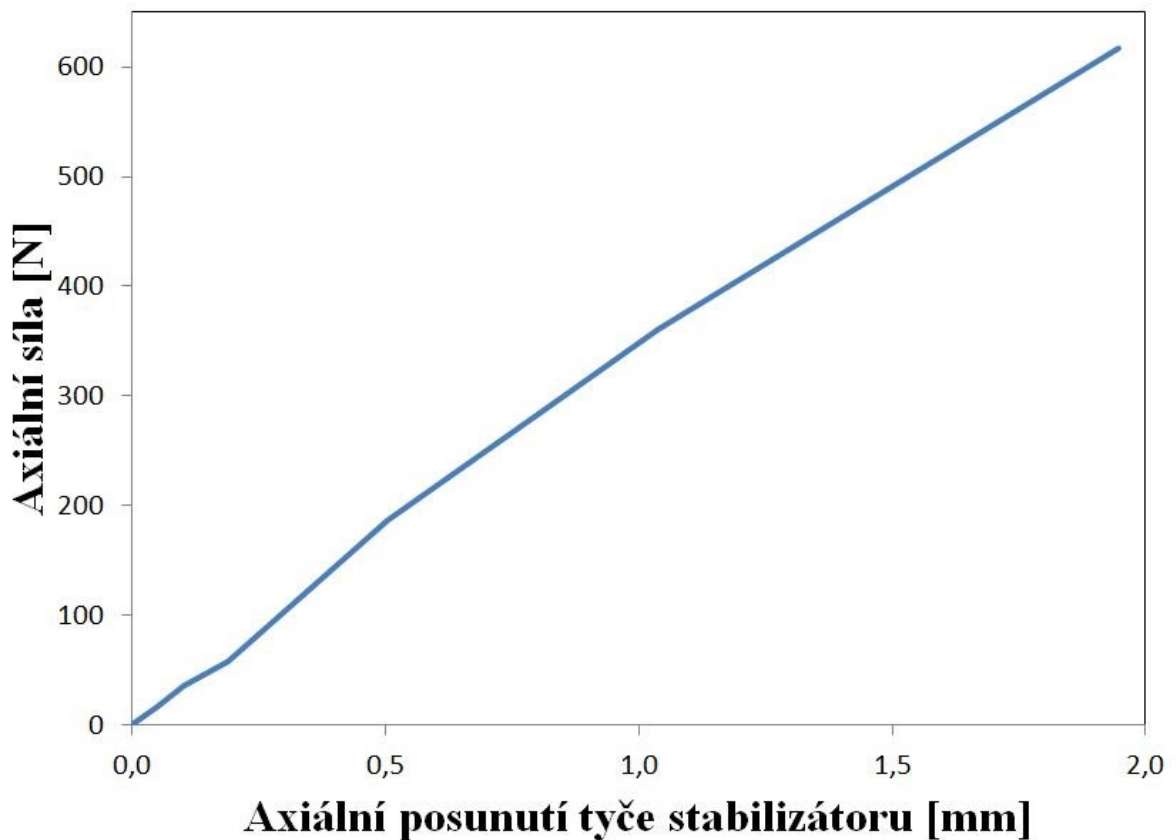
V prvním kroku měly červené křivky na Obr. 53 jeden stupeň volnosti v ose „Y“. Tyto křivky odpovídaly tyči stabilizátoru (spodní červená čára) a horní objímce (horní červená křivka). Během pohybu směrem k sobě do montážní polohy mezi sebou deformuly modrou plochu znázorňující pryžové pouzdro s hliníkovým jádrem.

Na začátku druhého kroku zatížení, byla tyč stabilizátoru zatížená axiální silou  $F = 1600 \text{ N}$  a měla jeden stupeň volnosti ve směru osy „Y“. Horní objímka neměla v druhém kroku žádný stupeň volnosti. Kontakt mezi pryžovým pouzdrům a tyčí stabilizátoru byl definován „glue“

### 9.2.1.4 Výsledky

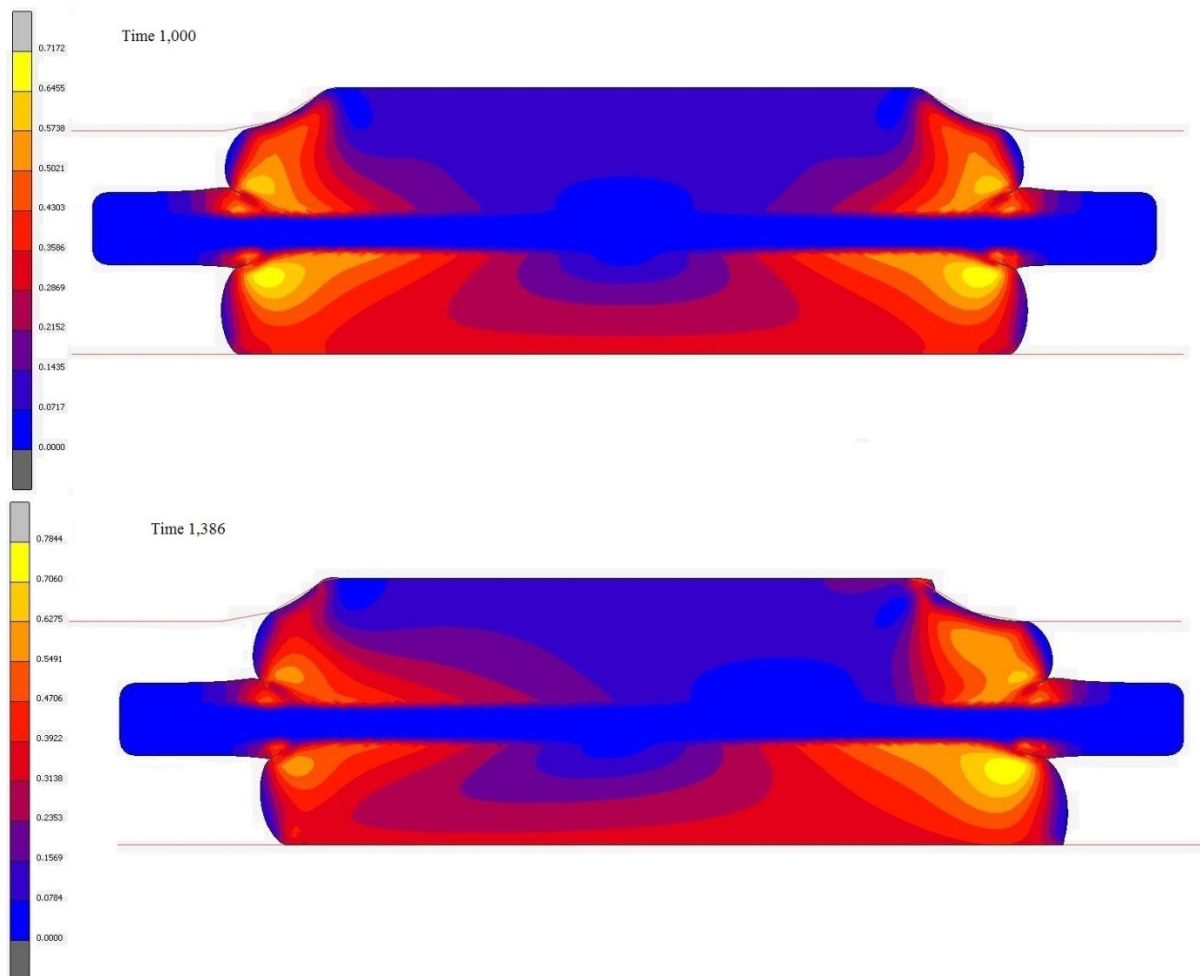
Při tomto typu zatížení došlo k situaci, kdy pouzdro vyklouzlo z horní objímky. Stalo se to v době  $\text{čas} = 1,386$ . To odpovídá zatížení 38,6% , které je 618 N. V tomto čase byla analýza ukončena.

Graf závislosti " Zatížení - posunutí" vidíme na Obr. 54. Tuhost byla stanovena z rozsahu zatěžující síly 430 N až 618 N (v reálném testu je rozsah 450 N až 650 N, v 3D analýze je rozsah 450 N až 606 N). Konečná hodnota axiální tuhosti modelu je 318 N / mm. Průměrná hodnota z reálných testů byla naměřena 332 N/mm a v 3D modelu spočítána 340 N/mm.



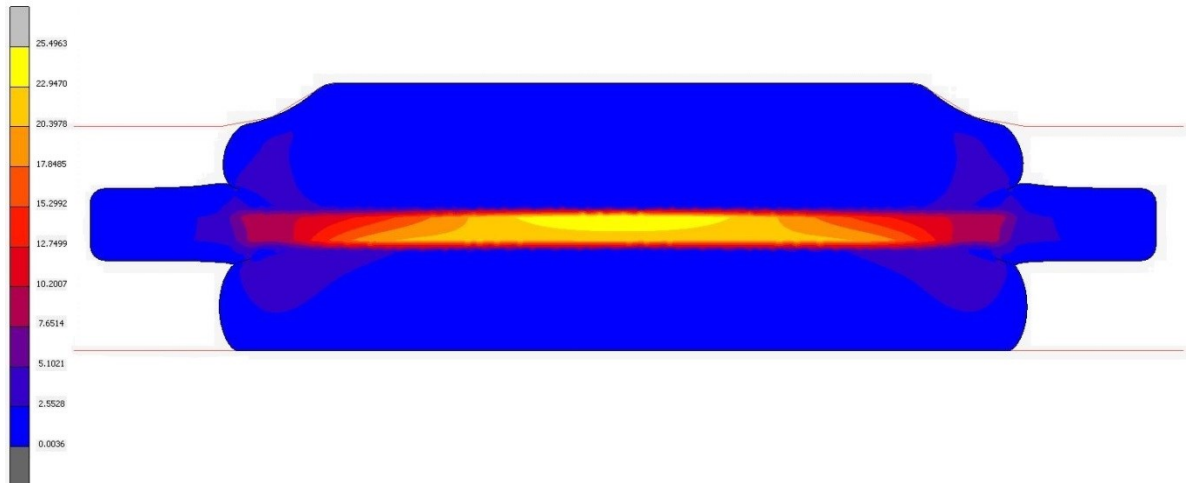
Obr. 54 Graf „zatížení – posunutí“ axiálního zatížení

Poměrné přetvoření Von Mises, na konci prvního a druhého kroku zatížení (čas = 1,386), je znázorněno na Obr. 54. Hodnota poměrného přetvoření v čase = 1,000 2D modelu axiálního zatížení a všech tří 3D modelů, by měla být stejná. Ve 2D modelu je hodnota  $\varepsilon = 0,72$  a téměř odpovídá 3D radiálnímu modelu ( $\varepsilon = 0,71$ ). Pro srovnání v axiálním 3D modelu je  $\varepsilon = 0,63$ . Jak můžeme vidět na Obr. 35, Obr. 42 a Obr. 55 Poměrné přetvoření Von Mises - Axální zatížení Obr. 55 rozdělení napětí je opět stejné. Důvodem rozdílů může být různá velikost konečně-prvkových elementů a druhu modelů. Konečná hodnota maximálního posunutí (čas = 1,386), se změnila jen nepatrně (na rozdíl od radiálního 3D modelu) na hodnotu  $\varepsilon = 0,78$ .

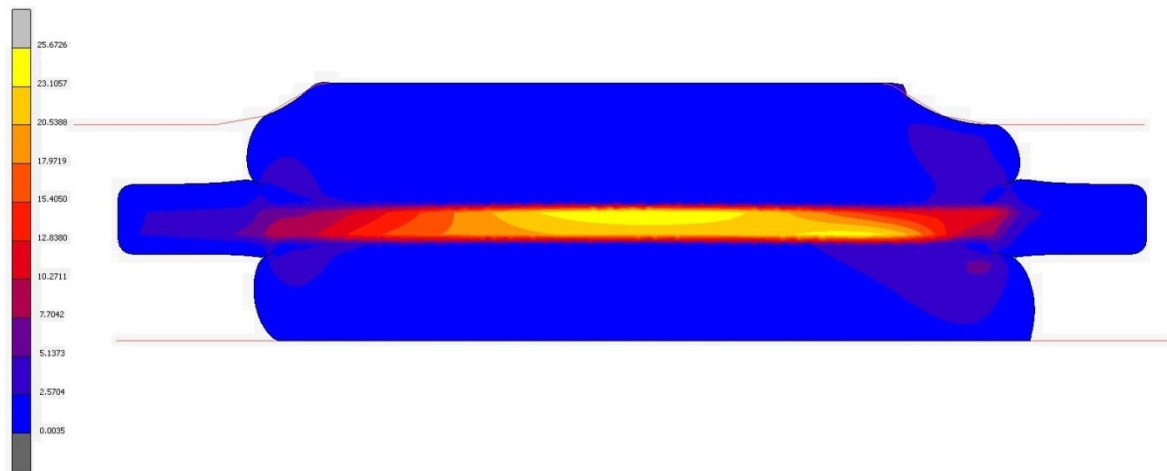


Obr. 55 Poměrné přetvoření Von Mises - Axální zatížení

Na Obr. 56 a Obr. 57 můžeme vidět, že napětí, stejně jako i deformace, je mezi koncem prvního kroku analýzy (čas = 1,000) a koncem druhého kroku analýzy (čas = 1,386) stejné. Zajímavé je, že napětí a deformace v čase čas = 1,000 je výrazně odlišné oproti 3D modelům. Důvodem tohoto rozdílu může být zjednodušení celého modelu na 2D a také to, že je model uvažovaný jako axisymetrický viz kapitola 9.2.1.1. Stejně jako v případě 3D modelů, napětí jsou soustředěny v blízkosti povrchu hliníkového jádra.



Obr. 56 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,0



Obr. 57 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,379

### 9.2.1.5 Statistika analýzy

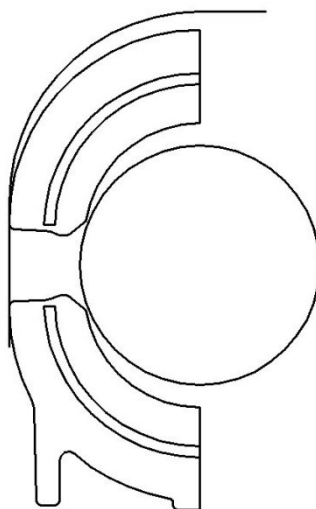
Počet uzlů	18 378
Počet prvků	13 546
Průměrná velikost prvku	0,2 mm
Symetrie modelu	1
Aplikovaná zatížení	1 600 N
Počet vypočítaných přírůstků - celkem	57
Počet vypočítaných přírůstků - první krok zatížení	18
Počet vypočítaných přírůstků - druhý krok zatížení	39
Maximální poměrné přetvoření elastomeru	0,78
Maximální napětí elastomeru	25,6 Mpa
Maximální napětí jádra	25,6 Mpa
Axiální tuhost pouzdra	318 N/mm

Tab. č. 7 Statistika analýzy axiálního zatížení

## 9.2.2 Radiální zatížení

### 9.2.2.1 Geometrie modelu

Pro 2D analýzu radiálního zatížení se využilo symetrie pomocí roviny rovnoběžné s osou tyče (viz Obr. 58). Aby se úloha mohla řešit ve 2D modelu, musela se zjednodušit. Pryžovému pouzdru i hliníkovému jádru byla přidělena konstantní tloušťka, a to 21 mm (délka kontaktu pryžového pouzdra a tyče stabilizátoru). Po zjednodušení vznikl  $\frac{1}{2}$  2D model.



Obr. 58 Model pro radiální zatížení

### 9.2.2.2 Materiálové vlastnosti

U 2D modelu radiálního zatížení byly provedeny dvě rozdílné analýzy. U první se uvažovalo rovinné napětí (Plane Stress), u druhé zase rovinná deformace (Plane Strain).

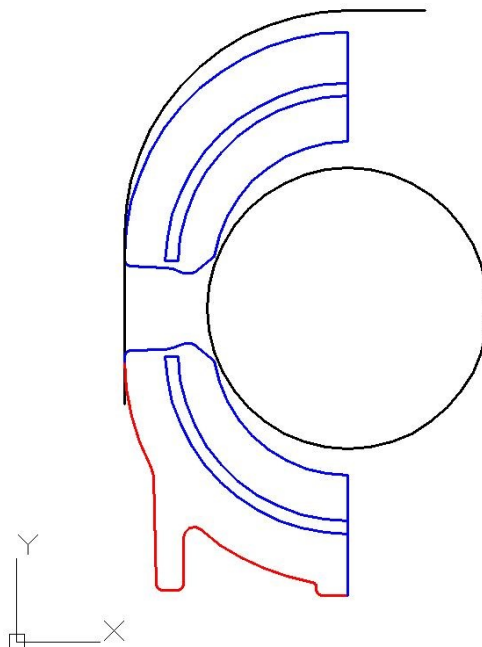
V případě rovinného napětí byly typy objektů nastaveny jako „2D Solid“. Konkrétně pro pryžové pouzdro „Reduced Integration“ a pro hliníkové jádro „Standart Formulation“.

Pro rovinnou deformaci tomu bylo obdobně. Typy objektů byly „2D Solid“, pryžové pouzdro „Hybrid (Herrmann) / Red.Int.“ a pro hliníkové jádro „Standart Formulation“.

Konkrétní materiálové konstanty byly již popsány v kapitolách 8.1.4 a 8.2.

### 9.2.2.3 Zatížení a okrajové podmínky

Pevná část, kde byly definovány všechny stupně volnosti, byla zvolena křivka spodního pryžového pouzdra (viz Obr. 59 červená křivka). Symetrie modelu byla definována na svislých křivkách horního i deformovaného dolního pryžového pouzdra včetně jeho hliníkového jádra (viz Obr. 59, modrá barva). Zde byl definován jeden stupeň volnosti v ose „Y“.



Obr. 59 2D model s vyznačenými plochami a křivkami radiálního zatížení

V prvním kroku byla provedena montáž. Horní objímka (horní černá křivky viz Obr. 59) se posunovala směrem dolů ve směru osy „Y“ do montážní polohy. Během tohoto pohybu tlačila proti sobě horní a dolní pryžové pouzdro (modré křivky) společně s tyčí stabilizáto-



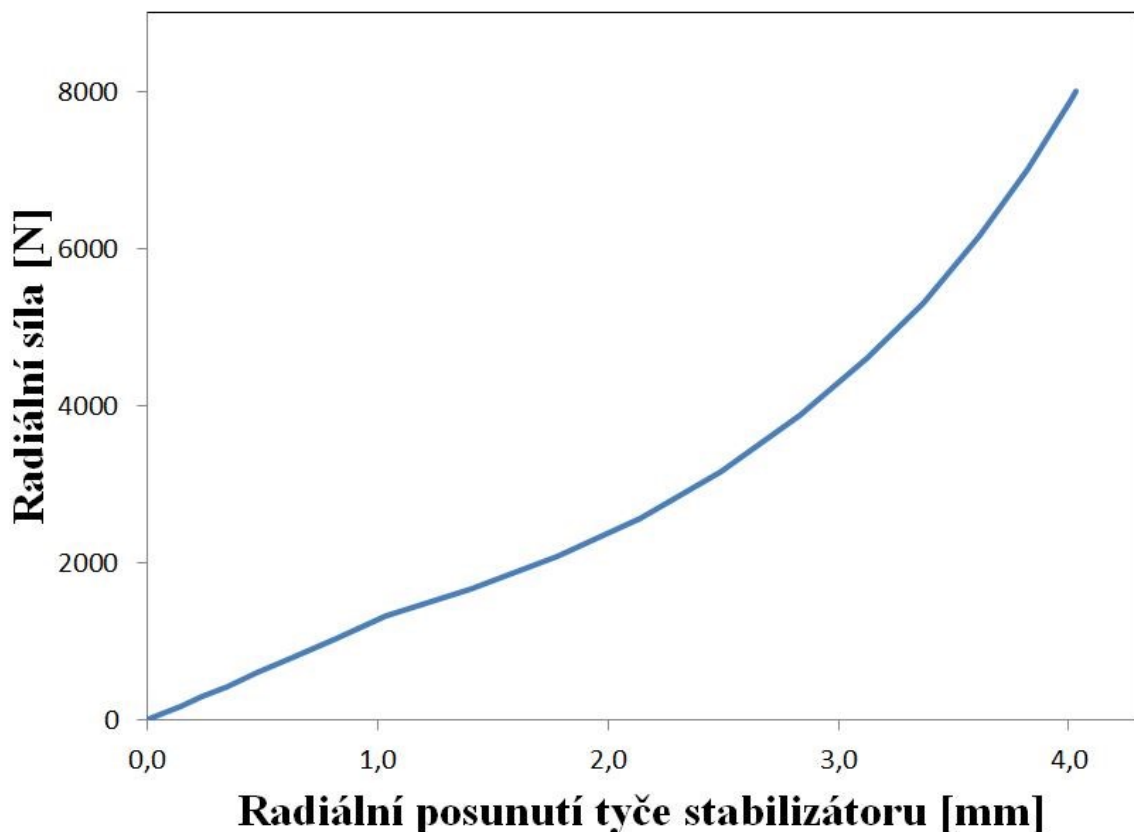
ru. Po dokončení montáže se tyč vtláčila do obou pouzder. Horní objímce a tyči stabilizátoru byl definován jeden stupeň volnosti v ose „Y“.

V druhém kroku byl definovaný kontakt mezi pouzdry a tyči stabilizátoru „glue“. Horní objímka a základna zůstaly ve stejné pozici jako na konci kroku jedna. Měli definované všechny stupně volnosti. Deformaci pouzder zajistila tyč stabilizátoru, která byla zatížena radiální silou 4 000 N a měla jeden stupeň volnosti (ve směru osy Y).

#### 9.2.2.4 Výsledky

##### *Rovinné napětí:*

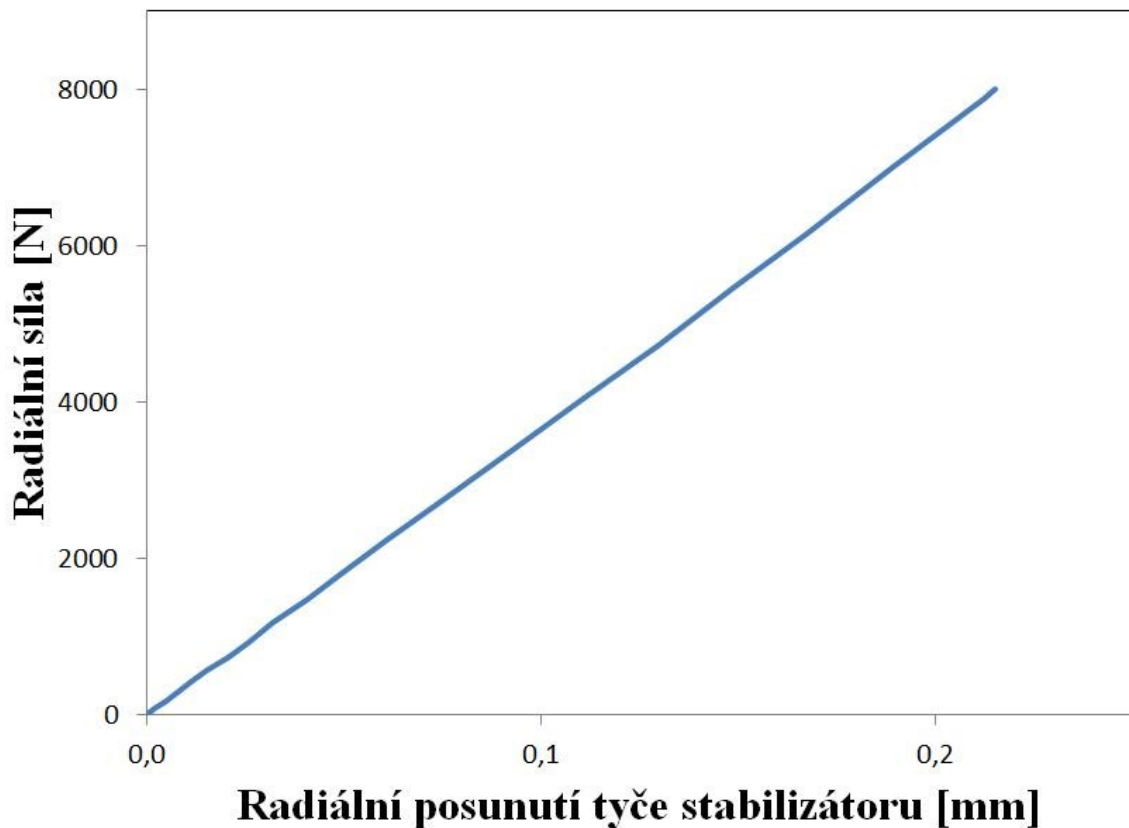
Výsledkem je stejně jako u 3D modelu radiální tuhost pouzdra. Z výsledku analýzy byl sestaven graf "zatížení - posunutí" (Obr. 60). Tuhost byla stanovena z rozmezí od 1 000 do 2 000 N (stejně jako v reálném testu uložení). Konečná hodnota radiální tuhosti modelu je 1 222 N/mm. Tato hodnota radiální tuhosti je výrazně nižší než u naměřené hodnoty v reálném testu (11 190 N/mm).



Obr. 60 Graf „zatížení – posunutí“ radiálního zatížení materiál „Plane Stress“

**Rovinná deformace:**

Výsledkem je stejně jako u předchozí analýzy radiální tuhost pouzdra. Z výsledku analýzy byl sestaven graf "zatížení - posunutí" (Obr. 61). Tuhost byla stanovena z rozmezí od 1 000 do 2 000 N (stejně jako v reálném testu uložení). Konečná hodnota radiální tuhosti modelu je 36 342 N/mm. U tohoto typu materiálových vlastností je naopak hodnota radiální tuhosti výrazně vyšší než u naměřené hodnoty v reálném testu (11 190 N/mm).



Obr. 61 Graf „zatížení – posunutí“ radiálního zatížení materiálu „Plane Strain“

Z výsledků radiálního zatížení je vidět, že v případě rovinného napětí je hodnota radiální tuhosti výrazně nižší a v případě rovinné deformace naopak výrazně vyšší než u reálného testu nebo 3D modelu. Aby se mohla daná úloha řešit pomocí zjednodušení na 2D model, musela by se alespoň jedna hodnota radiální tuhosti přiblížit reálným testům. Z těchto důvodů není možné využít zjednodušení situace na 2D model.

Toto situace platí obecně pro většinu 3D výrobků. Proto nebyl 2D model torzního zatížení prováděn.

## ZÁVĚR

Předložená diplomová práce je zaměřena na provedení numerických analýz, dle stanovených okrajových podmínek jednotlivých zatížení pryžového uložení stabilizátoru automobilu.

Na základě výsledků zkoušek pryžového materiálu a vhodného hyperelastického výpočetního modelu „2<sup>nd</sup> order invariant“ byly stanoveny materiálové konstanty pouzdra. Tyto konstanty byly přiřazeny společně s okrajovými podmínkami a zatížením jednotlivým modelům. Pomocí těchto modelů bylo možné provádět analýzy pro radiální, axiální a torzní zatížení. Získané výsledky analýz se porovnávaly s výsledky reálných testů.

Pro posouzení jednotlivých numerických modelů a reálných testů pryžového pouzdra je rozhodující hodnota tuhosti daných zatížení. Vypočtené hodnoty modelů jsou v rozmezí několika málo procent (od 1% do 8%) oproti naměřeným hodnotám z reálného testu. Na základě malé procentuální výpočtové odchylky radiálního, axiálního a 2D axiálního numerických modelů dostaneme dobrý obraz celkového napětí a deformací pryžového uložení pryžového uložení stabilizátoru automobilu.

Výpočtem 2D modelu axiálního zatížení byla získána axiální tuhost pryžového pouzdra 318 N/mm a výpočtem 3D modelu tuhost 340 N/mm. Rozdíl vypočítané tuhosti 2D analýzy a 3D analýzy činí 7% a mezi 2D analýzou a reálným testem činí 4%.

U prováděných analýz by měl být zahrnut také vliv tření mezi horní objímkou a pouzdrem. Prováděné analýzy vliv tření nezahrnují, protože výpočet modelu, včetně tření, je velmi časově náročný.

Další problém nastal v modelu torzního zatížení, kde docházelo k ukončení výpočtu. Zde musela být odstraněna část kontaktu, jak je popsáno v kapitole 9.1.3.1 a 9.1.3.2. Pro zahrnutí úplného kontaktu do analýzy, bude nutné model upravit více k realitě.

V případě 2D modelů radiálního zatížení se analýza provedla pro rovinné napětí a rovinou deformaci. Vypočtené hodnoty radiální tuhosti se výrazně lišily. Z tohoto důvodu se daná úloha nedá řešit pomocí 2D modelu. Stejná situace by nastala i v případě 2D modelu torzního zatížení.

Numerická analýza axiálního zatížení prokázala, že se dá využít plošného 2D modelu s poměrně přesnými výsledky.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. DVOŘÁK, Z. a J. JAVOŘÍK. Konstrukce výrobků konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu. In: [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, © 2009 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://www.utb.cz/file/41197\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/41197_1_1/)
2. DVOŘÁK. *ZRACOVATELSKÉ PROCESY GUMÁRENSKÉ*. Zlín: UTB, 2013
3. *Patran 2010 : User's Guide*. MSC.Software Corporation, 2010, 228 s
4. TURÍN, J. *Numerická analýza a tvarová optimalizace pryžové*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2010, 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Javořík, Ph.D.
5. PREKOP, Š. *Gumárska technológia I*. Žilina: 1. vyd. Žilina, 1998. 282 s. ISBN 8071004839.
6. DVOŘÁK, Z. ZÁKLADY VÝROBNÍCH PROCESŮ. In. *Konstrukce gumárenských výrobků a forem pro jejich výrobu* [online]. Zlín: © 2007 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: [http://www.utb.cz/file/40833\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/40833_1_1/)
7. ŠŮLA, M. *Pojení pryže s kovem*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina, 2007. 63 s. ISBN 978-80-02-01934-3.
8. *Elastomeric: 3D models*. Theory of Hyperelasticity (+ 3D Models).pdf.
9. JAVOŘÍK, J. *Hyperelasricita*. Zlín: učební text. UTB, 9 s
10. KLEDROWETZ, B. J. *Numerická analýza a tvarová optimalizace podávání materiálu ve vícevřetenovém automatu*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2010, 99 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Javořík, Ph.D.
11. ŠEVČÍK, J. *Návrh stavitelného stabilizátoru přední nápravy vozu Formule student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.
12. *CAD* [online]. [cit. 2014-01-25]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/4188-predni-naprava-osobniho-automobilu.html>

13. *Just answer* [online]. [cit. 2014-01-25]. Dostupné z:  
<http://www.justanswer.com/toyota/5h0la-toyota-avelon-2002-toyota-avelon-93-000mi.html>
14. *Autolexikon* [online]. [cit. 2014-01-25]. Dostupné z:  
<http://cs.autolexicon.net/articles/klikova-naprava/>
15. *The MGFG* [online]. [cit. 2014-01-25]. Dostupné z:  
<http://www.mgf.ultimatemg.com/group2/suspension/hydragas.htm>
16. DOC. ING. JAKUB JAVOŘÍK, P.D. *APLIKACE VÝPOČETNÍCH* [Učební text]. Zlín:
17. FUSEK, M., K. FRYDRÝŠEK a J. HRABEC. *Praktikum software MSC.MARC/MENTAT – část 2*. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, 2010, 144 s. ISBN 978-80-248-2211-2.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D	plošný model	
3D	prostorový model	
$b$	šířka vzorku	[mm]
BR	butadienový kaučuk	
C	uhlík	
$c$	materiálové konstanty	
$C_{ij}$	deformační tenzor	
Cl	chlór	
$D$	průměr vzorku	[mm]
E	modul pružnosti	[MPa]
F	síla	[N]
FEM	finite element method	
G	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
H	vodík	
$I_i$	invariant tenzoru deformace	
$I_m$	limitní hodnota členu	
IR	izoprenový kaučuk	
$k$	Boltzmanova konstanta	[J.K-1]
K	objemový modul pružnosti	[MPa]
$L_0$	počáteční vzdálenost	[mm]
$li$	poměrná deformace	
M	vada vulkanizačního spoje	
M	množina materiálových konstant	
MgO	oxid hořečnatý	
MPK	metoda konečných prvků	

N	dusík	
n	počet polymerních řetězců	
N	počet proměných	
NBR	butadienakrylonitrilový kaučuk	
NR	přírodní kaučuk	
O	kyslík	
p	tlak	[MPa]
PbO	oxid olovnatý	
R	vada vulkanizačního spoje	
RC	vada vulkanizačního spoje	
SBR	butadienstyrenový kaučuk	
$S_{ij}$	tenzor napětí	
T	absolutní teplota	[K]
$t$	tloušťka vzorku	[mm]
Tet4	3D element tetrahedron	
$t_{ij}$	skutečné napětí	
Triat3	2D trojúhelníkový element	
UV	ultrafialové záření	
$v$	výška vzorku	[mm]
W	deformační energie	[J.m <sup>-3</sup> ]
X	osa modelu	
Y	osa modelu	
Z	osa modelu	
$\delta_{ij}$	Kronekerovo delta	
$\varepsilon$	poměrné přetvoření	
$\lambda_i$	poměrné protažení	[%]

---

$\lambda_L$	limitní protažení	
$\mu$	Poissonova konstanta	
$\phi$	rotace tyče stabilizátoru	[rad]
$\partial$	parciální derivace	
$\mu$	počáteční smkový modul	



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Struktura polymerů [4] .....	13
Obr. 2 Strukturní vzorec SBR [4] .....	18
Obr. 3 Strukturní vzorec BR [4] .....	18
Obr. 4 Strukturní vzorec NBR [4] .....	18
Obr. 5 Strukturní vzorec IR [4].....	19
Obr. 6 Vulkanizační křivka [1] .....	25
Obr. 7 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů [1] .....	30
Obr. 8 Příklad chování konkrétního elastomeru v jednotlivých módech zatěžování [1].....	38
Obr. 9 Jednoosý tah [9].....	39
Obr. 10 Rozměry zkušebního tělesa [10].....	39
Obr. 11 Dvouosý tah [9] .....	40
Obr. 12 Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku [9].....	40
Obr. 13 Princip použité metody pro dvouosé protahování [10] .....	41
Obr. 14 Rozměry zkušebního vzorku [10].....	41
Obr. 15 Čistý smyk [9] .....	42
Obr. 16 Rozměry zkušebního vzorku .....	42
Obr. 17 U-stabilizátor [12].....	43
Obr. 18 U-stabilizátor s táhlem [13] .....	44
Obr. 19 Kliková náprava [14] .....	44
Obr. 20 Hydropneumatické odpružení [15].....	45
Obr. 21 Uložení stabilizátoru automobilu.....	47
Obr. 22 Hliníkové jádro .....	47
Obr. 23 Montážní výkres .....	48
Obr. 24 Vektor posunutí bodů $u(x)$ tělesa.....	49
Obr. 25 Závislost napětí - deformaci při jednoosém tahu.....	52
Obr. 26 Závislost napětí - deformaci při dvouosém tahu .....	53
Obr. 27 Závislost napětí - deformaci při čistém smyku.....	54
Obr. 28 Srovnání křivek napětí-deformace tří zkoušek .....	54
Obr. 29 Roviny symetrie uložení stabilizátoru .....	57
Obr. 30 Typ elementu – tetrahedron [16] .....	58
Obr. 31 Model pro radiální zatížení.....	59
Obr. 32 Plocha (červená) s nulovým posunutím radiálního zatížení.....	59

Obr. 33 Orientace os a plochy symetrie (modré) radiálního zatížení .....	60
Obr. 34 Graf „zatížení – posunutí“ radiálního zatížení .....	61
Obr. 35 Poměrné přetvoření Von Mises - Radiální zatížení.....	62
Obr. 36 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Radiální zatížení – čas 1,0 .....	63
Obr. 37 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Radiální zatížení – čas 2,0.....	63
Obr. 38 Model pro axiální zatížení .....	64
Obr. 39 Plocha (červená) s nulovým posunutím axiálního zatížení .....	65
Obr. 40 Orientace os a plochy symetrie (modré) axiálního zatížení .....	65
Obr. 41 Graf „zatížení – posunutí“ axiálního zatížení.....	66
Obr. 42 Poměrné přetvoření Von Mises - Axální zatížení .....	67
Obr. 43 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,0 .....	68
Obr. 44 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,379 .....	68
Obr. 45 Model pro torzní zatížení.....	69
Obr. 46 Plocha (červená) s nulovým posunutím torzního zatížení.....	70
Obr. 47 Orientace os a plochy symetrie (modré) torzního zatížení .....	70
Obr. 48 Graf „zatížení – rotace“ torzního zatížení .....	71
Obr. 49 Poměrné přetvoření Von Mises - Torzní zatížení.....	72
Obr. 50 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Torzní zatížení – čas 1,0.....	72
Obr. 51 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Torzní zatížení – čas 1,714.....	73
Obr. 52 Model pro axiální zatížení .....	74
Obr. 53 2D model s vyznačenými plochami a křivkami axiálního zatížení.....	75
Obr. 54 Graf „zatížení – posunutí“ axiálního zatížení.....	76
Obr. 55 Poměrné přetvoření Von Mises - Axální zatížení .....	77
Obr. 56 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,0 .....	78
Obr. 57 Ekvivalentní napětí Von Mises [MPa]- Axiální zatížení – čas 1,379 .....	78
Obr. 58 Model pro radiální zatížení.....	79
Obr. 59 2D model s vyznačenými plochami a křivkami radiálního zatížení.....	80
Obr. 60 Graf „zatížení – posunutí“ radiálního zatížení materiál „Plane Stress“ .....	81
Obr. 61 Graf „zatížení – posunutí“ radiálního zatížení materiál „Plane Strain“ .....	82

**SEZNAM TABULEK**

Tab. č. 1 Aplikované zatížení .....	48
Tab. č. 2 Konstanty modelu 2nd Order Invariant .....	55
Tab. č. 3 Materiálové vlastnost hliníkového jádra.....	56
Tab. č. 4 Statistika analýzy radiálního zatížení .....	64
Tab. č. 5 Statistika analýzy axiálního zatížení.....	69
Tab. č. 6 Statistika analýzy torzního zatížení .....	73
Tab. č. 7 Statistika analýzy axiálního zatížení.....	79