

Stanovení vhodného materiálového modelu pro numerický model pneumatiky

Bc. Michal Huňa

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Huša**
Osobní číslo: **T14515**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Stanovení vhodného materiálového modelu pro numerický model pneumatiky**

Zásady pro vypracování:

1. Literární přehled
2. Stanovení materiálových konstant daných modelů
3. Srovnání a výběr nejvhodnějšího modelu
4. Vyhodnocení 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:

2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 2. února 2017



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



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11.5.2017

.....


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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá porovnáním různých materiálových modelů a nalezení vhodného modelu, který nejlépe vystihuje hyperelastické chování elastomerních kompozitů – pneumatik.

Teoretická část se zabývá konstrukcí pneumatik, jejich složením, funkcí a výrobou. Dále je zde zmínka o elastomerech a hyperelastických modelech, jež se užívají pro predikci mechanického chování.

Praktická část se zabývá vymodelováním pneumatiky společně s několika různými vrstvami materiálů, jež je podrobena tlakovému zatížení. Následuje otestování různých materiálových modelů, s cílem porovnat jednotlivé hyperelastické modely.

Klíčová slova: Pneumatika, hyperelastické modely, marc, mentat, elastomery

ABSTRACT

The diplomatic thesis deals with the comparison of different material models and the finding of a suitable model, which best describes the hyperelastic behavior of elastomeric composites -tires.

The theoretical part deals with tire construction, composition, function and production. There is also a reference to elastomers and hyperelastic models that are, used to predict mechanic behavior.

The practical part deals with modeling of the tire together with several different layers of materials under pressure. This is followed by testing different material models to compare individual hyperelastic models.

Keywords: Tire, hyperelastic models, marc, mentat, elastomers

Na tomto místě bych chtěl poděkovat, svému vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za vedení, ochotu a čas věnovanému při zhotovení práce. A v neposlední řadě také mé rodině, za podporu při studiu a zhotovení téhle práce.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PNEUMATIKY	11
1.1 DEFINICE PNEUMATIK	11
1.2 FUNKCE PNEUMATIK	13
1.3 KONSTRUKCE PNEUMATIKY	15
1.4 VÝROBA PNEUMATIK	19
1.4.1 Suroviny	19
1.4.2 Příprava kaučukových směsí	26
1.4.3 Zpracování kaučukových směsí	29
1.4.4 Konfekce	30
1.4.5 Vulkanizace	32
2 ELASTOMERY	33
2.1 VŠEOBECNÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	33
2.1.1 Hyperelasticita elastomerů	36
2.2 HYPERELASTICKÉ MATERIÁLOVÉ MODELÝ	38
2.3 STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH KONSTANTY PRO HYPERELASTICKÉ MODELÝ	42
3 MARC MENTAT	44
3.1 FUNKCE REBAR	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
4 MATERIÁLOVÉ HODNOTY ELASTOMERU	48
5 NASTAVENÍ MODELU PNEUMATIKY	51
5.1 MODEL PNEUMATIKY	51
5.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	56
5.2.1 Nastavení uchycení	56
5.2.2 Nastavení tlaku	60
5.2.3 Nastavení materiálů	62
5.2.4 Nastavení výpočtu	69
5.3 VYBRANÉ VÝSLEDKY	72
6 VÝSLEDKY	74
6.1 VLIV TUHOSTI ELASTOMERU	75
6.2 MATERIÁLOVÉ HODNOTY VYBRANÝCH MODELŮ	77
7 VYHODNOCENÍ	82
7.1 SROVNÁNÍ HYPERELASTICKÝCH MODELŮ	82
7.1.1 Srovnání hyperelastických modelů pro jednoosý tah	82
7.1.2 Srovnání hyperelastických modelů pro dvouosý tah	84
7.1.3 Srovnání hyperelastických modelů pro čistý smyk	86
7.1.4 Stanovení nejvhodnějšího hyperelastického modelu	88

ZÁVĚR	92
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	94
SEZNAM OBRÁZKŮ	95
SEZNAM TABULEK.....	98

ÚVOD

K neodmyslitelným technickým prostředkům dnešní doby patří různá vozidla, např. osobní a nákladní automobily, stavební, zemědělské a lesnické stroje, letadla. Je zřejmé, že kola takových vysoce výkonných zařízení nemohou být konstruována slepě metodou pokusu a omylu, ale že při jejich navrhování je třeba využít moderní konstrukční prostředky.

Počítače se v posledních desetiletích staly atributy technologického rozvoje téměř ve všech odvětvích lidské činnosti. Strojírenské projekční práce se dají značně automatizovat a výsledky přenést na CNC stroje. Laserová optika a videokamery se používají v optické kontrole, počítačová termografie (CT) umožňuje prostorové zobrazení vnitřní struktury výrobků. Tak fyzika a matematika našly úrodnou půdu i tam, kde ještě nedávno byly zcela ignorovány.

Ačkoli pneumatická obruč byla patentována už v roce 1845 a znovu vynalezena v roce 1880, první teoretické práce týkající se její konstrukce se objevily až v roce 1950. Příslušná teorie byla však příliš neschůdná (integrace funkce se singularitou) a její praktické využití bylo podmíněno použitím počítačů, které tehdy byly v plenkách. V dekadách 1970 a 1980 se také používaly graficko-numerické metody a pro usnadnění jejich aplikací byly publikovány speciální monogramy. V této době se k získání meridionální křivky pneumatiky používaly také analogové počítače. S masovou aplikací číslicových počítačů a zvláště PC tento směr rychle zanikl. Vývoj elektroniky a numerických metod měl značný vliv na různé obory gumárenského průmyslu (výroba strojů a forem, automatizace, navrhování výrobků, zkušebnictví).

Je jasné, že pneumatika jako reálný objekt se musí reprezentovat ve velmi zjednodušené formě, aby odpovídající matematické modely zůstaly fyzikálně názorné a mohly být úspěšné při hledání odpovědí na vhodně položené otázky.

Kdykoli je to možné, měly by se teoretické výsledky každého modelu porovnávat s experimentálními výsledky. Zpravidla se dříve nebo později najdou experimentální fakta, která se s teoretickými předpověďmi neshodují. Pak se model musí adaptovat, pokud to jde, nebo je nutné model opustit a nahradit jej lepším. Takový proces se znovu a znovu opakuje a spirálový vývoj je charakteristickým rysem obecného získávání poznatků.

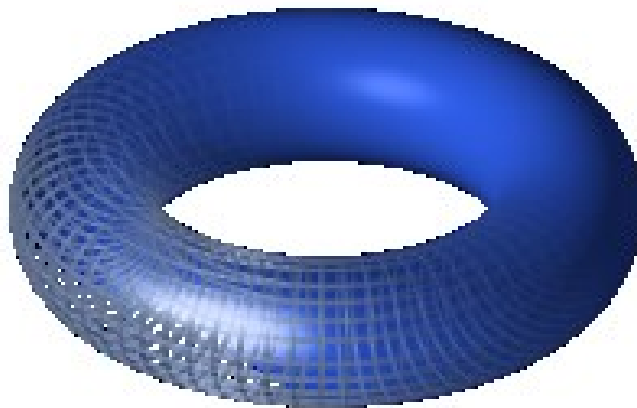
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PNEUMATIKY

1.1 Definice pneumatik

S pneumatikou, jež je součástí většiny dopravních prostředků přicházíme pravidelně do styku a přitom většina lidí ani nemá základní znalosti o její funkci a konstrukci. [1]

Z geometrického hlediska je pneumatika uzavřený prstenec tzv. toroid (obr 1.).

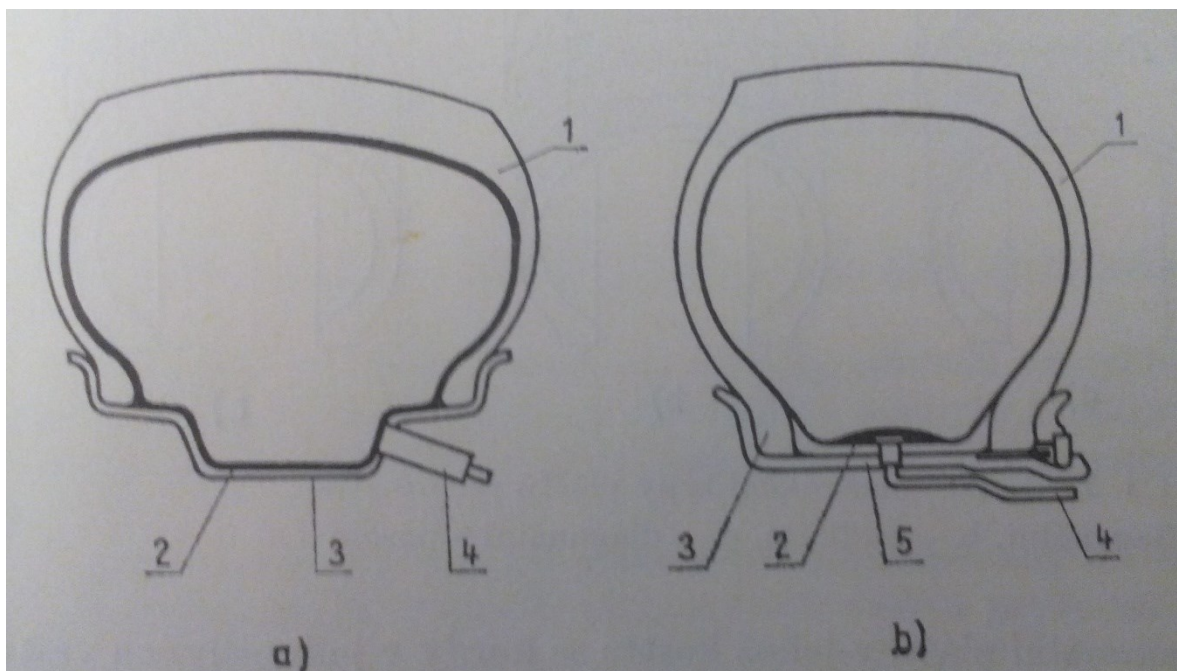


Obr. 1 Toroid [10]

Z mechanického hlediska je pneumatika tlaková nádoba, jejíž stěny tvoří pružná membrána. Strukturou je pneumatika složitý systém s vysokými parametry.

Z chemického hlediska je pneumatika vyrobena zejména ze zesíťovaných a nezesíťovaných makromolekulárních materiálů a oceli.

Základní pojmy názvosloví pneumatik jsou dány normou na mezinárodní úrovni.



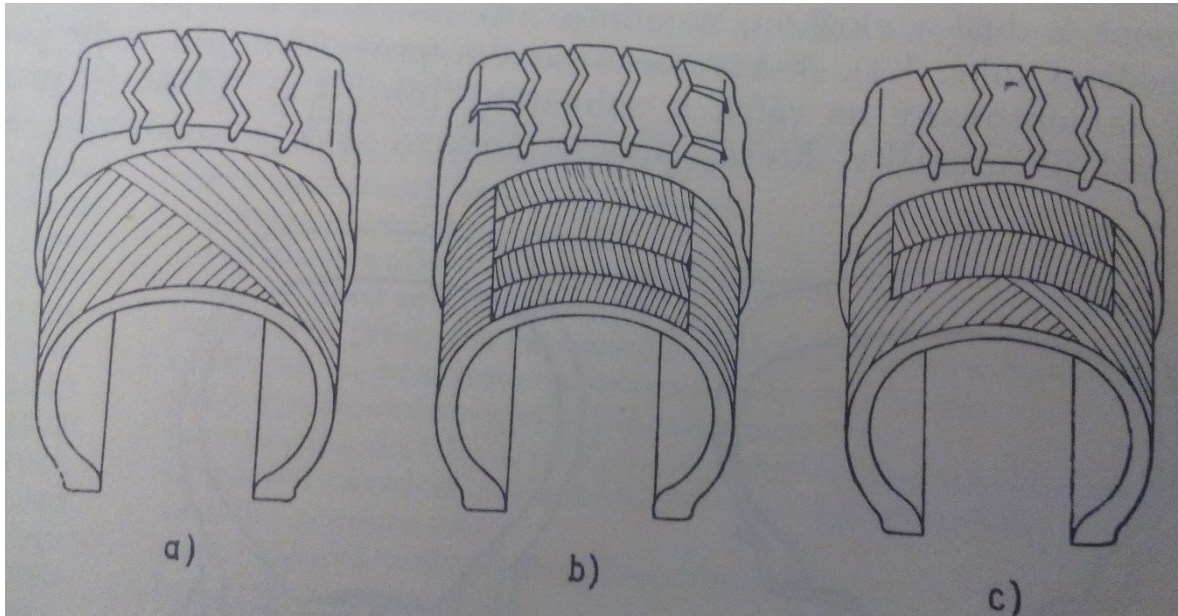
Obr. 2 Pneumatika pro osobní (a) a nákladní (b) automobil

1 – plášť pneumatiky, 2 – duše, 3 – ráfek, 4 – ventil, 5 – vložka

Podle normy ČSN 64 0001 značí souborový termín pneumatika plášť, popř. s duší a vložkou, namontovaný na ráfek a naplněný tlakovým médiem. V tzv. bezdušovém provedení jde tedy pouze o plášť namontovaný na ráfek, který je nahuštěn. Plášť je pružná vnější část pneumatiky, která zprostředkovává styk s vozovkou, svou patní částí dosedá na ráfek a má rozhodující podíl na vlastnostech celé funkční soustavy. Duše je tenkostěnný pryžový uzavřený prstenec, sloužící k udržení potřebného tlaku vzduchu v pneumatice, je opatřen ventilem, který umožňuje nahuštění a vypuštění vzduchu nebo jiného tlakového média. Ochranná vložka je pryžový profilovaný prstenec, chráníci duši před poškozením ráfkem. Používá se převážně u nákladních a motocyklových pneumatik. Ráfek je buď jednodílný nebo vícedílný prstenec vhodně tvarovaný pro uchycení pláště.

Ráfek přenáší hnací nebo brzdící sílu mezi patkou pláště a střední nosnou částí kola.

Podle konstrukčního uspořádání se rozlišují tři základní typy pláštěů pneumatik:



Obr. 3 Základní konstrukční typy pláštěů pneumatik

a – diagonální, b – radiální, c – diagonální s pásem

Diagonální plášť, v jehož kostře se kordy v jednotlivých vrstvách kříží, může být opatřen nárazníkem malé pevnosti, který nepřenáší prakticky žádné obvodové namáhání, pouze vyztužuje korunní část pláště.

Diagonální plášť s pásem má diagonální kostru přepásanou nárazníkem, který zachycuje značnou část namáhání v obvodovém směru. Tento plášť tvoří přechod mezi diagonálním a radiálním pláštěm

Radiální plášť, v jehož kostře jsou jednotlivé nitě kordových vrstev rovnoběžně vzájemně i s rovinou meridiánu, přepásanou výztužným pásem - nárazníkem. Nárazník zachycuje veškerá namáhání v obvodovém směru v běhounové části pláště a je proto patřičně dimenzován.
[1] [2]

1.2 Funkce pneumatik

Základní požadavky, které se na pneumatiky kladou, lze shrnout do těchto bodů:

- schopnost nést určitou zátěž,
- schopnost tlumit nárazy,
- přenášet hnací a brzdící síly,
- vyvíjet boční síly,

- vyznačovat se dobrou adhezí k vozovce za různých podmínek,
- být rozměrově stabilní,
- umožňovat přiměřený tzv. kilometrový výkon,
- reagovat na řízení,
- klást minimální valivý odpor,
- vyvíjet co nejméně hluku a vibrací,
- mít celkově dlouhou životnost,
- přispívat k bezpečnému provozu,
- mít minimální hmotnost.

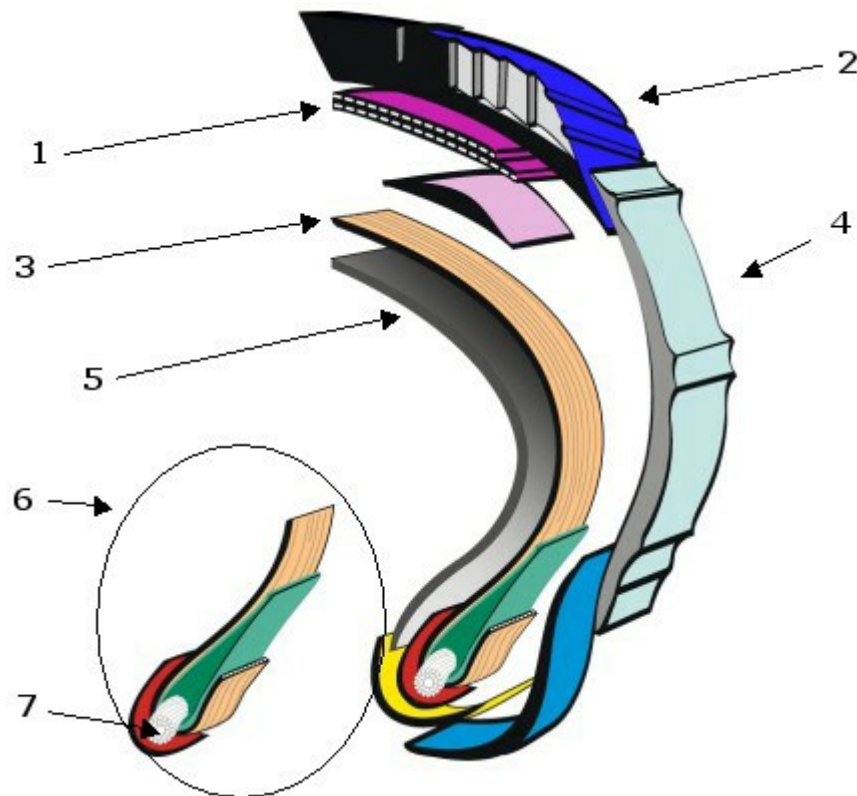
Jednotlivé funkční požadavky nejsou seřazeny podle důležitosti. Pneumatika je musí v uspokojivé míře splňovat všechny. Soubor těchto nezbytných předpokladů splňuje právě jen pneumatika. Je to dáno především jedinečnou deformovatelností a tlumícími charakteristikami struktury pneumatiky.

Rozsah aplikací pneumatiky se zdá být nekonečný. Například letadla jsou vybavována pneumatikami, třebaže je to nežádoucí zátěž a navíc nevykonávají žádnou funkci po 99 % doby provozu stroje. Ve zbývající části provozu, tj. při startu a přistávání, jsou pneumatiky podstatnou funkční částí a nebyla pro ně dosud vyvinuta žádná náhrada. Požadavky kladené na pneumatiku, jež jsou uvedeny výše, lze rozdělit do tří oblastí:

- a) pohyblivost vozidla (např. adheze, boční síla, kroutící moment, ovladatelnost, prokluz, řídicí účinek, vedení atd.),
- b) vlastnosti a jejich integrita (např. ekonomie paliva, jízdní teplota, vzrůst rozměrů, vzrůst tlaku, odolnost proti propíchnutí, odolnost proti průrazu, odolnost proti únavě, odolnost proti opotřebení atd.),
- c) estetika a komfort (např. drnění, házení, hlučnost, kmitání, tuhost atd.).

Každá z těchto oblastí zahrnuje mnoho různých detailních požadavků, k nimž se musí při konstrukci a vývoji pneumatik přihlížet. [1]

1.3 Konstrukce pneumatiky



Obr. 4 Konstrukce pláště pneumatiky

1 – korunní kordová vrstva, 2 – běhoun, 3 – radiální kordová vrstva, 4 – bočnice, 5 – vnitřní gumová vrstva, 6 – patka, 7 – patní lano

Plášť pneumatiky se skládá u z těchto hlavních strukturních prvků:

Korunní kordová vrstva (nárazník) - je část pláště mezi běhounem a kostrou, tvořená kordovými vrstvami uspořádanými zpravidla tak, že se kordy jednotlivých vrstev kříží. Nárazník vyztužuje plášť v koruně.



Obr. 5 Korunní kordová vrstva

Běhoun - tj. vrstvy pryže na vnějším obvodu obvykle opatřené vzorkem (dezénem), která přichází do styku s vozovkou. Skládá-li se ze dvou vrstev pryže rozdílné kvality, jde o tzv. dvojitý (spodní a horní) běhoun.



Obr. 6 Běhoun

Radiální kordová vrstva (kostra) - kostra je část pláště tvořená vložkami většinou zakotvenými kolem patních lan. Skladba a složení těchto vložek určují základní vlastnosti pláště. Od křížové tkaniny v dávné historii, k paralelnímu kladení netkaných kordových vláken v současnosti. Podle složení kordové vrstvy rozlišujeme pneumatiky radiální a diagonální.

- a) Kostra radiálního pláště – část pláště tvořená vložkami, z nichž všechny kordy leží v meridiálních rovinách pláště. Kordové vložky jsou zakotveny kolem lan.
- b) Kostra diagonálního pláště – část tvořená vložkami, u nichž se kordy v jednotlivých vrstvách kříží. Kordové vložky jsou zakotveny kolem lana.



Obr. 7 Kostra

Bočnice - je část pláště, kterou tvoří vrstva pryže na jeho boku a jejímž účelem je chránit kostru pláště před nepříznivými povětrnostními vlivy a před mechanickým poškozením.



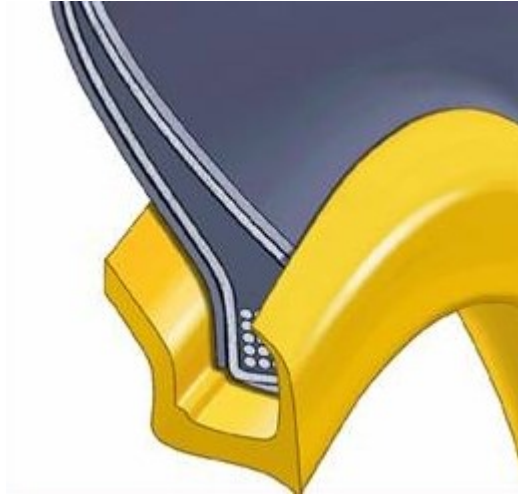
Obr. 8 Bočnice

Vnitřní gumová vrstva - zabraňuje úniku vzduchu z vnitřku pláště. V bezdušových pneumatikách plní roli duše.



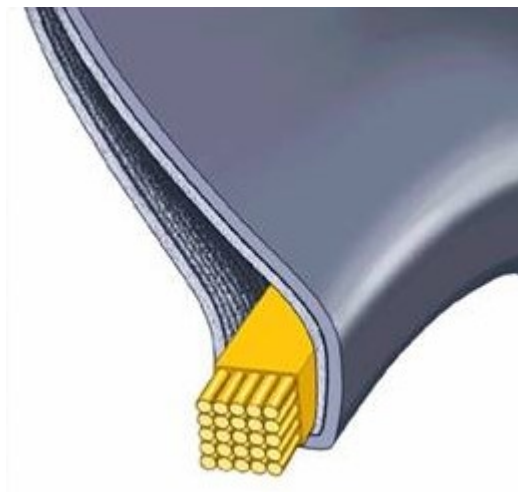
Obr. 9 Vnitřní gumová vrstva

Patka - je zesílená část pláště dosedající na ráfek, vytvořená ohnutím kostrových kordových vložek kolem ocelového patního lana. Jádro je tvořeno patním lanem vyrobeného z vysokopevnostního ocelového lana.



Obr. 10 Patka

Patní lanko - je kruhový dílec z vysokopevnostního ocelového drátu. Slouží k zakotvení kordových vložek v patce pláště a mimo to vyztužuje patku v obvodovém směru, čímž zaručuje bezpečné usazení pláště na ráfku. [4] [1] [7]



Obr. 11 Patní lano

1.4 Výroba pneumatik

1.4.1 Suroviny

Kaučuky

Pod pojmem kaučuky rozumíme takové polymery, které mohou být převedeny chemickým (nebo i fyzikálním) zasíťováním v elastomery (pryže). 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. Po zvolení základního elastomeru je třeba uvážit jeho gumovitost, tj. obsah ve směsi. Kaučuk jako základní složka směsi se někdy doplňuje regenerátem, popř. jiným polymerem.

Základní dělení kaučuků:

- Přírodní kaučuk
- Syntetický kaučuk (Butadien kaučuk, Izopren kaučuk, Chloropren kaučuk Butadienstyren kaučuk, Butadiennitril kaučuk, Etylénpropylén kaučuk, Butyl kaučuk, Akryl kaučuk, Polyester kaučuk, Fluor kaučuk, Polysulfidový kaučuk, Silikon kaučuk)

Vybrané zkratky kaučuků:

- ABR - akrylátový kaučuk
- CR - chloroprenový kaučuk
- EPDM - ethylenpropylenový dienový kaučuk
- EPR - ethylenpropylenový kaučuk
- FC - fluorokaučuk
- IIR - izobuten-izoprenový kaučuk (butylkaučuk)
- IR - izoprenový kaučuk
- NR - přírodní kaučuk
- PB - butadienový kaučuk
- SBR styren-butadienový kaučuk
- YAU termoplastický polyuretanový
- YEPM termoplastický etylen- propylenový

Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se získává ze stromů kaučukovníku, zejména druhu *Hevea brasiliensis*. Kaučukovníky rostou v tropických pásmech Jižní Ameriky, jihovýchodní Asie i Afriky. Po naříznutí 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.



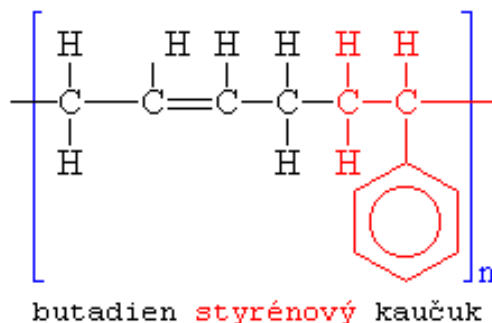
Obr. 12 Kaučukovník brazilský a přírodní kaučuk

Přírodní, surový kaučuk (latex) se získává z tropického stromu kaučukovníku brazilského nařezáním jeho kůry (obr. 12). Dále se upravuje srážením (např. kyselinou mravenčí), peroxidem a suší, buď horkým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa, tzv. uzený kaučuk).

Rozvoj průmyslu, díky kterému roste spotřeba kaučuku, zejména na výrobu pneumatik, přiměl chemiky k nalezení odpovídající náhrady přírodního kaučuku. I když se dnes vyrábí spousta druhů různých syntetických kaučuků, přírodní kaučuk se i tak stále používá, neboť dodává směsím požadované vlastnosti. Navíc má v současné době příznivou cenu.

Syntetický kaučuk

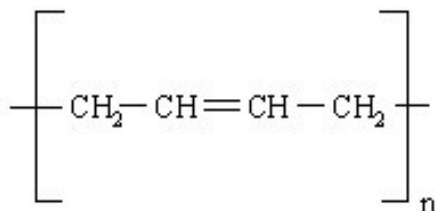
Butadien-styrenový kaučuk (SBR) (styrene-butadiene rubber)



Obr. 13 Strukturální vzorec butadien
styrenového kaučuku

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

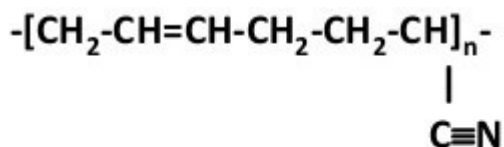
Polybutadienové kaučuky (BR) (butadiene rubber)



Obr. 14 Strukturální vzorec
Polybutadienového kaučuku

Vyrábí se především roztokovou polymerací pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů, kdy vznikají produkty s vysokým podílem 1,4-butadienových jednotek. Polybutadieny s vysokým podílem cis-1,4-butadienových jednotek mají vysokou odolností proti oděru, odolnost proti vzniku trhlin a také vyšší odrazovou pružností, než přírodní kaučuk. Navíc dobře snášejí plniva. Využití našly hlavně v průmyslu k výrobě pneumatik.

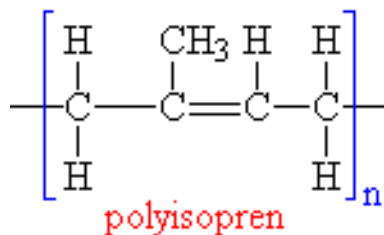
Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR) (nitrile-butadiene rubber)



Obr. 15 Strukturní vzorec Butadien-akrylonitrilového kaučuku

A jiné typy nitrilových kaučuků se vyrábějí radikálovou kopolymerací butadienu s 18 až 49% akrylonitrilu. Se vzrůstajícím obsahem AN stoupá Tg a tvrdost, klesá elasticita a bobtnavost v pohonných látkách a olejích. Hlavní oblastí použití jsou benzínové hadice, těsnění, klínové řemeny, dopravní pásy, válce pro tiskařský, textilní a papírenský průmysl.

Polyisopren (IR) (isoprene rubber)



Obr. 16 Strukturní vzorec

Polyisoprenového kaučuku

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 sazemí.

Plniva

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

Základní vlastnosti směsi se upravují plněním, tj. přidavkem většího množství nejčastěji práškových přísad. Tím se mění prakticky všechny vlastnosti: hustota, tvrdost, modul, elasticita, tažnost, strukturní pevnost, dále zpracovatelnost, ale především cena pryže, neboť plniva se používají především ke snížení její ceny. S plněním klesá plasticita a směs se hůře hněte. Podle fyzikálního významu jsou plniva dělena na:

- aktivní (ztužovadla): přechodně zlepšují pevnost, (př. saze MPC, HAF, Silika),
- pasivní: pevnost zhoršují, (př. saze MT, kaolín, křída).

Plnivo se používá k úpravě vlastností, jež by samotný polymer buď neměl výrazné, nebo by je neměl vůbec. Další funkce plniva je snížení ceny výsledného produktu. Dnešní polymerní materiály jsou komplexní směsi, kde základem je monomer, a příměsi se pohybují v řádech desítek procent. Přítomnost plniv má významný vliv na vlastnosti vulkanizátu.

Saze

Mezi jedny z nejdůležitějších plniv kaučukových směsí patří saze. Důvodem, proč jsou saze používány, je fakt, 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.

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

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. 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.

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.

Změkčovadla

Změkčovadla zvyšují plasticitu a usnadňují tak mechanické zpracování. Používají se různé minerální oleje. 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, je méně tuhý a má nižší teplotu křehnutí. Nevýhodou je, že přítomnost změkčovadla zhoršuje mechanické vlastnosti pryže. Zpracovatelností se myslí plasticita, tvarovatelnost a lepivost.

Antioxidanty a antiozonanty

I po vulkanizaci zastávají v zesíťovaném polymeru dvojné 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. Stárnutí elastomerů a vulkanizátů má řadu příčin. Úkolem stabilizace je zpomalit nebo dočasně úplně zastavit průběh stárnutí.

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.

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.

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. Kaučuková směs zpravidla obsahuje všechny výše zmíněné složky.

Typová skladba kaučukové směsi

- Kaučuk 100 dsk
- Síra 0,5 – 50 dsk
- Urychlovač 0,3 – 4 dsk
- ZnO 1 – 10 dsk
- Kyselina stearová 0 - 4 dsk
- Antioxidant 0 – 3 dsk
- Změkčovač 2 – 3 dsk
- Plnivo 20 – 300 dsk

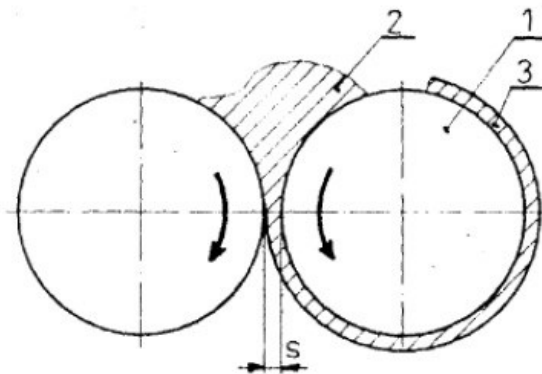
1.4.2 Příprava kaučukových směsí

Příprava směsí, a zvláště jejich míchání, je jedním z nejdůležitějších procesů v gumárenském průmyslu. Gumárenské směsi je možno připravovat na dvouválcových strojích, v hnětičích či v kontinuálních hnětičích. Surový kaučuk, který přichází do gumárenských provozů, je nutno před dalším zpracováním plastifikovat do určitého stupně, aby byl schopen přijímat přísady a byl dobře zpracovatelný danou technologií.

V průběhu plastifikace se snižuje molekulová hmotnost kaučuku, což umožňuje a zlepšuje průběh dalších technologických operací. Plastifikaci je třeba vést jen do takového stupně, kterého je nevyhnutelně třeba pro úspěšné zpracování. Nadměrnou plastifikací se zhoršují mechanické vlastnosti vulkanizátů a zhoršuje se i odolnost proti únavě a stárnutí.

Míchání na dvouválci

Dnes patří k již překonaným technologiím. Používá se jen pro přípravu speciálních směsí v malém množství, pro barevné směsi s vysokými nároky na dodržení odstínu a směsí pro houbovou pryž. Zařízení se skládá ze dvou ocelolitinových válců rovnoběžně horizontálně uložených, které se otáčejí různou rychlostí proti sobě. Skluz válců bývá 1:1,2 – 1:1,5. Pro syntetické kaučuky s malou pevností se používá menšího skluzu. Válce jsou duté nebo jinak uzpůsobené (př. mají navrtané otvory) pro chlazení vodou, popř. vyhřívání párou. Přebytkem materiálu nad štěrbinou se vytváří návalek 2. Souvislá vrstva válcovaného materiálu 3 dopravovaná u dvouválce přímo nebo přes pomocné válečky zpět do skusu (u víceválců do další štěrbiny) se nazývá opásání. Šířka štěrbiny se nastavuje ručně, motoricky.



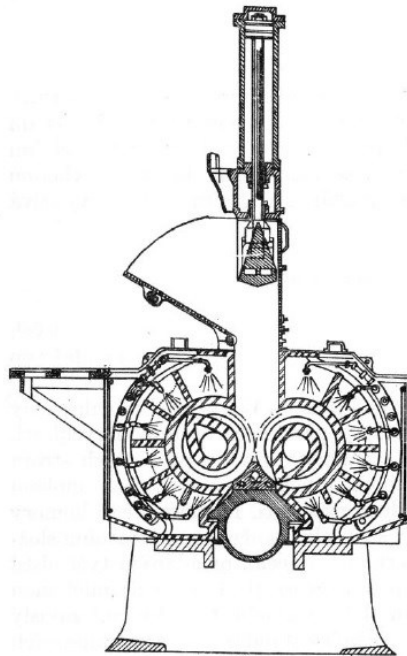
Obr. 17 Schéma míchání kaučukové směsi
na dvouválci

1 – válec, 2 – návalek, 3 – opásání, s – skus

Příprava kaučukové směsi v hnětacích strojích

Požadavky průmyslu se postupně zvyšovaly a hnětiče musely těmto zvýšeným požadavkům vyhovět. Zvláště nástup syntetických kaučuků vyžadoval, aby stroje byly schopny míchat tužší směsi, které více hřály při míchání. Bylo třeba vyvinout nové způsoby chlazení, zvyšovaly se výkony, otáčky, vznikaly problémy s rychlejším opotřebením. Výrobci strojů opět zdokonalili konstrukci a použili kvalitnějších materiálů. Zvýšením otáček a tlaků se postupně zkrátila doba potřebná pro zamíchání směsí. Moderní vysokotlaké hnětiče vykazují časovou úsporu až 70% ve srovnání se staršími typy strojů. Dosahuje se toho tím, že je dostatečná rezerva síly, aby stroj po celou dobu míchání běžel při plném tlaku horního uzávěru

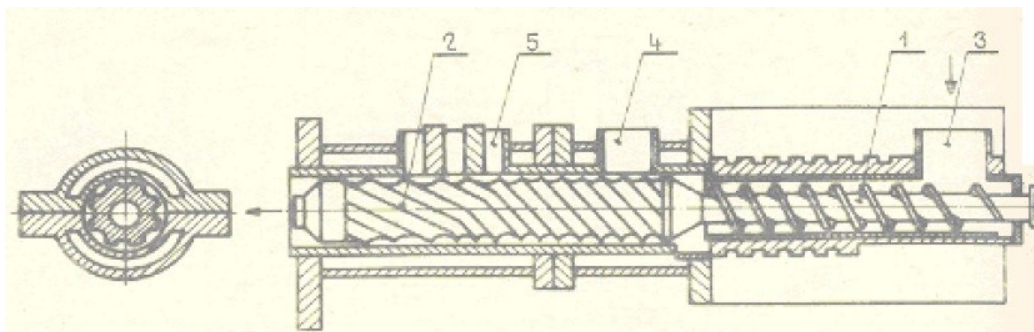
na směs. Umožňuje to také, aby určité směsi byly zamíchány naráz, zatímco u nízkotlakých standardních hnětičů je třeba přidávat přísady v několika stupních, aby nedošlo k přetížení motoru.



Obr. 18 Řez hnětacím strojem
typu Banbury

Příprava kaučukové směsi v kontinuálních hnětičích

Požadavky na zvyšování produkce i kvality při přípravě směsi a na úsporu energie, vedly k vývoji hnětičů s plynulým provozem. V podstatě jde vesměs o jednošnekové či vícešnekové stroje, které mají různé provedení s ohledem na druhy zpracovávaných materiálů.



Obr. 19 Hnětič Rotomill

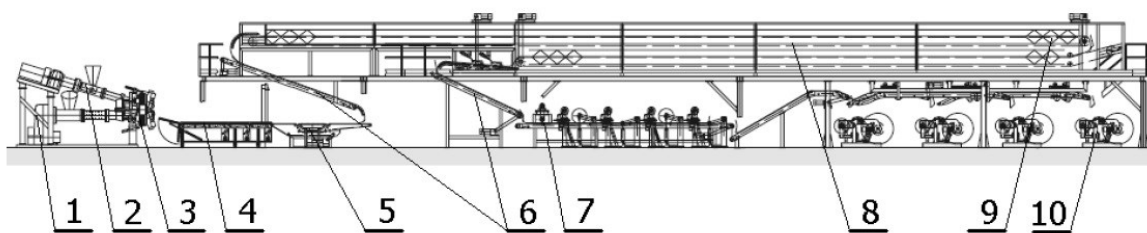
1 – šnek, 2 – míchací šnek, 3 – násypka, 4,5 – pomocné plnicí otvory

1.4.3 Zpracování kaučukových směsí

Kaučukové směsi jsou základním polotovarem pro výrobu výrobků. Před vlastním procesem vulkanizace je obvykle kaučuková směs zpracována tvářením na potřebný polotovar nazývaný obecně konfekce, nebo konfekční díl. Tento polotovar může být připraven v jednom kroku, nebo ve více krocích. Zpravidla je dělen do oblasti tzv. homogenních polotovarů, což znamená, že polotovar tvoří pouze kaučuková směs nebo na polotovary nehomogenní, obsahující ponejvíce výztužné materiály. Polotovary - jak homogenní, tak nehomogenní, mohou být připravovány z jedné složky a jedné kaučukové směsi, nebo z více složek a různých kaučukových směsí.

Vytlačování

Vytlačování obecně je jedna z nejproduktivnějších metod zpracování kaučukových směsí a plastických hmot. Rozumí se tím proces, při kterém se směs rozpracovává nejčastěji mezi šnekem a pláštěm vytlačovacího stroje a přes šablonu (profilovaný otvor) je vytlačována do volného prostoru. Po vytlačení následují další operace jako je fixace tvaru a rozměru, vulkanizace eventuelně chlazení, úprava okrajů, atd. Kaučukové směsi vyžadují při vytlačování zcela jiné podmínky než plastické hmoty. Kvalita výrobků závisí na mnoha činitelích. Směs musí mít správné složení a musí obsahovat především přísady, které usnadňují vytlačování, pokud ovšem zároveň nepříznivě neovlivní požadované vlastnosti výrobku. Směs musí být správně rozpracována před zavedením do stroje.



Obr. 20 Linka na vytlačování bočnic

1,2 – vytlačovací stroje, 3 – vytlačovací hlava, 4,6 – odtahovací dopravník, 5 – úseková váha, 7 – rozřezávací zařízení, 8 – etážová chladička pásu s vodou, 9 – ofukovací zařízení, 10 – dokončovací zařízení

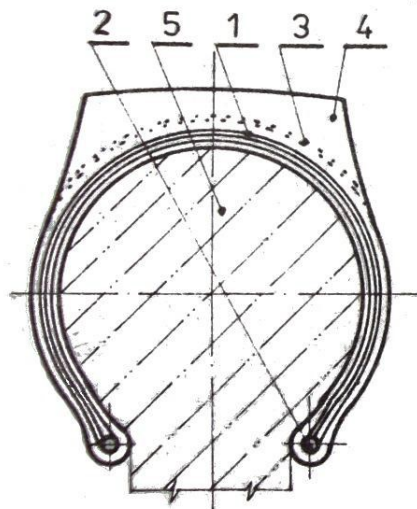
1.4.4 Konfekce

Konfekce surových plášťů pro automobily patří k nejsložitějším konstrukcím a to z hlediska potřebné přesnosti polotovarů, tak i z hlediska jejich přesného umístění v surovém plášti. Navíc jsou konfekční díly v průběhu přípravy konfekce dále tvarovány a tvářeny, často jsou tvarovány těsně před vulkanizací ve vulkanizační formě. Mezi ostatní výrobky využívající konfekční přípravu patří např. dopravní pásy, hnací řemeny, hadice apod. Způsob konfekce a příprava konfekčních dílů a polotovarů odpovídá požadavkům kladeným na konečný výrobek. Polotovary- konfekční díly se postupně podle konfekčního předpisu pokládají na plochu konfekčního bubnu, který se otáčí okolo své osy. Podle tvaru výsledné konfekce jsou konfekční bubny děleny konfekční bubny pro:

- plochou,
- polokulatou,
- kulatou konfekcí.

Kulatá konfekce

Celá konfekce pláště se obvykle provádí na kovovém nebo pryžovém jádru, jehož tvar a velikost se téměř shoduje s vnitřními rozměry hotového pláště. Dnes se již ve výrobě nepoužívá. Možné je setkat se s ní v protektorovnách. Výjimečně se tyto technologie využívají v kusové a malosériové výrobě.

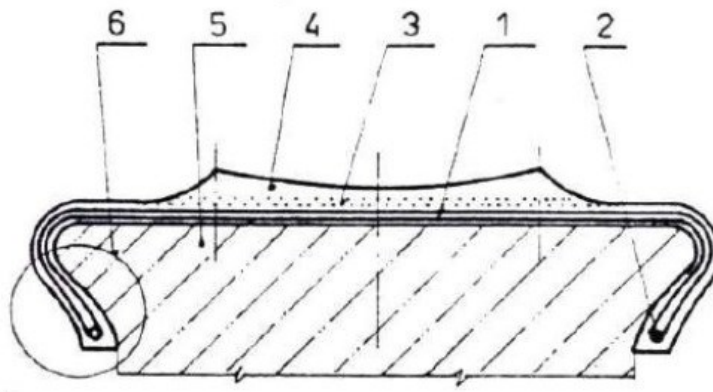


Obr. 21 Kulatá konfekce

1 – kostra, 2 – patní lano, 3 – nárazník, 4 – běhoun, 5 – konfekční jádro

Polokulatá konfekce

Zachovává tvar a polohu patek pláště ve stejném stavu, v jakém budou na hotovém plášti. Největší průměr kostry je na konfekčním bubnu podstatně větší, než průměr patek. Surový plášť, zhotovený na tomto konfekčním bubnu, si zachovává tento tvar po celou dobu, než se založí do vulkanizačního lisu. Zde se dosáhne konečného tvaru a rozměru bombírováním surového pláště, tlakem pryžové membrány umístěné uvnitř konfekce proti dutině formy.

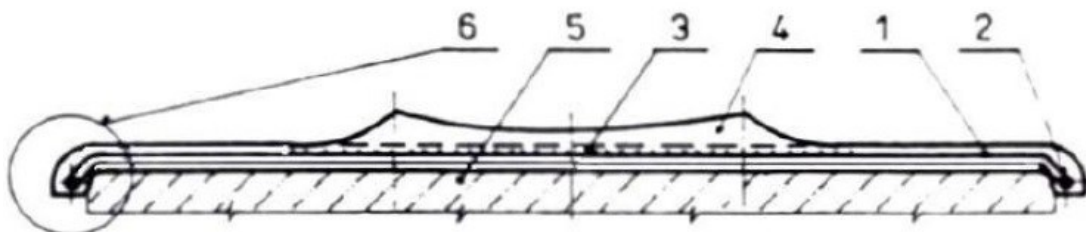


Obr. 22 Polokulatá konfekce

1 – kostra, 2 – patní lano, 3 – nárazník, 4 – běhoun, 5 – konfekční buben, 6 – patka

Plochá konfekce

Používá různých tvarů konfekčních bubnů, na kterých se vyrábí kostra autopláště s největším průměrem téměř shodným s průměrem patek. Podobně jako u polokulaté konfekce, tak i u ploché konfekce si surový plášť zachovává válcový tvar po celou dobu, než se vloží do formy vulkanizačního lisu. Při bombírování surového pláště ve vulkanizačním lisu dochází k přetáčení patek o více než 90° . Konfekce patky se otáčí kolem patního lana, které zachovává svoji původní polohu. Toto otáčení patky je pro plochý způsob konfekce charakteristické, a proto je zbytečné dělit tento způsob ještě na poloplochou a plochou konfekci.



Obr. 23 Plochá konfekce

1 – kostra, 2 – patní lano, 3 – nárazník, 4 – běhoun, 5 – konfekční buben, 6 – patka

Podle celkové skladby konfekce pláště s radiální konstrukcí se konfekce rozdělují na následující základní způsoby:

- jednostupňová konfekce,
- jedenapůlstupňová konfekce,
- dvoustupňová konfekce.

1.4.5 Vulkanizace

Děj, při kterém vznikají v kaučukové směsi pevné chemické vazby mezi jednotlivými řetězovými molekulami za pomoci vulkanizačních činidel. Optimální hustota síťové prostorové struktury závisí na teplotě a čase, po které působí na elastomerní směs. Vzájemný vztah teploty a doby vulkanizace se vyjadřuje – teplotní koeficient vulkanizace. Ten udává vzrůst rychlosti vulkanizace při zvýšení teploty o 10°C (jeho hodnoty jsou 1,8-2,5 v závislosti na skladbě elastomerní směsi). Teplota vulkanizace je funkcí i typu kaučuku a volí se v rozmezí 140 - 200°C. Vyšší teplota – zkrátí se vulkanizační čas, zvýší se teplotní spád se všemi důsledky. Pro kvalitní vulkanizát je důležitý tlak při vulkanizaci. Přestup tepla mezi zdrojem a elastomerní směsí je neúčinnější z kovových forem a dále v nasycené páře. Nejhorší je v horkém vzduchu a ohřevem v objemu. Provozní způsoby vulkanizace jsou dva:

- Kontinuální ve vulkanizačních tunelech (solné lázně, horkovzdušné tunely, MW tunely), bubnových lisech.
- Diskontinuální vulkanizace ve formách, přímé páře, horké vodě, horkém vzduchu, bubnových lisech.

Technologický postup vulkanizace:

- tvarování elastomerní směsi do tvaru výrobku (za tepla, za studena),
- zahřívání na vulkanizační teplotu,
- výdrž na vulkanizační teplotě – vulkanizace (teplota, čas, tlak),
- vyjmutí výrobku z formy (výrobek se ve formě nechladí).

Nejvíce gumárenských výrobků se vulkanizuje ve formách (lisech), vulkanizace může však probíhat i při přetlačování nebo vstřikování. [1] [2] [3] [4] [5]

2 ELASTOMERY

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. Jejich významnost potvrzuje i ta skutečnost, že se mohou stát v součástkové základně stroje rozhodující z hlediska jeho životnosti a spolehlivosti. Stejně jako jiné konstrukční materiály, je možné vhodnou skladbou kaučukové směsi a použitím gumárenských surovin získat materiály o potřebných, nebo speciálních vlastnostech.

Elastomery (přírodní a syntetická pryž) jsou směsí amorfních polymerů a dalších přísad. Vulkanizací se těchto materiálů vzniká "pryž, guma". Tyto materiály nejsou jen pružné, ale díky své viskoelastické povaze jsou schopny pohlcovat kinetickou energii. V tlaku a smyku vykazují relativně vysokou pevnost. Stejně jako u jiných materiálů u nich může dojít k materiálové únavě a jejich následnému porušení. Je možné definovat vlastnosti tohoto materiálu a využít numerické systémy k analýze jeho chování. Pro tyto účely je nutná dostupnost materiálových parametrů jako okrajové podmínky případného výpočtu a analýzy.

2.1 Všeobecné vlastnosti elastomerů

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 způsobu jejich výroby, teploty, času atd.

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 μ (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.

Zkoušky materiálu je možné rozdělit ze dvou hledisek. První je hledisko výrobce, eventuelně prodejce materiálu a druhé je hledisko konstrukční. Výrobci a prodejci srovnávají vyrobený, dodaný materiál se standardem nebo srovnávají jejich fyzikální, případně chemické vlastnosti s tabulkovými. Konstruktérři naopak využívají zjištěné fyzikální vlastnosti materiálu

pro konstrukci konkrétních výrobků. Dále se je možné setkat se zkouškami provozními či technologickými, které již probíhají na základě dodavatelsko - odběratelských dohod.

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. Uvedené vlastnosti lze měnit v široké škále hodnot vhodnou volbou složení elastomerní směsi. Skladbou elastomerní směsi se zabývá řada publikací. Skladby směsí pro dané podmínky řeší gumárenské podniky a firmy, které nabízí své elastomerní směsi i dalším výrobcům.

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 .

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

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.

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.

Vulkanizace kaučukové směsi je fyzikálně-chemický proces, při kterém, za působení teploty a tlaku po určitý časový interval, se kaučuková směs mění na vulkanizát. To znamená, že v látce, která má charakter převážně plastický, působením fyzikálních sil za dodání tepla po danou dobu dojde k 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.

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

Vulkanizace elastomerní směsi ve formách neprobíhá v celém objemu, zejména u silnostěnných výrobků, ve stejném čase díky špatné vodivosti elastomerní směsi. Vlastnosti výrobku jsou pak ovlivněny vlastnostmi směsi, vulkanizačními podmínkami, jeho tvarem a rozměry a použitou výrobní technologií.

Pro třídění základních vlastností vulkanizátů se používá normalizační třídění.

K orientačnímu rozlišení je v současné době využíváno základních fyzikálních 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.

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.

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. 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 její 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.

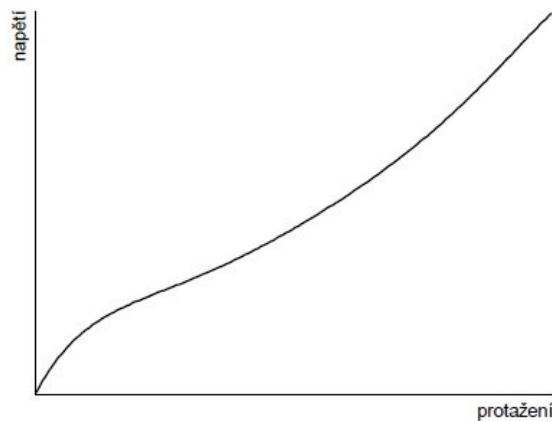
Mezi skutečnosti, ke kterým je nutno při konstrukci elastomerního prvku přihlídnout, je vysoký rozptyl číselných hodnot fyzikálních vlastností. Dále je nutno se zmínit o skutečnosti, že fyzikální hodnoty jsou měřeny na zkušebních vzorcích vyrobených v úzké toleranci technologických podmínek, navíc za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

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 namáhány rázy. V technické praxi se však nachází výrobky a konstrukční prvky namáhané kombinovaně všemi třemi uvedenými způsoby.

2.1.1 Hyperelasticita elastomerů

Elastomery se vyznačují některými charakteristickými rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních materiálů (ideálně elastických). Souhrn těchto vlastností, jak bylo uvedeno dříve, je často označován jako hyperelasticita 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. 24).
- Materiál se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je asi desettisíckrát 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 napětí ku deformaci) se pak Poissonův poměr blíží hodnotě $\mu=0,5$ (v závislosti na obsahu plniv). To znamená, že většinu těchto materiálů lze považovat za objemově nestlačitelné.



Obr. 24 Závislost napětí a deformace
při zatěžování elastomerů

Dalším charakteristickým rysem elastomerů je časová závislost deformace. Elastické deformační přeměny probíhají s určitým zpožděním, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování elastomerů 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 C) tuhost materiálu výrazně roste a může se přiblížit vlastnostem kovů. Při vysokých teplotách (nad 100 C) naopak dochází k velkému poklesu tuhosti.

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 větší deformace zatěžovaného prvku. Pro přesné výpočty a pro případy větších deformací je nutno použít nelineární popis závislosti napětí-deformace.

Intenzivní vývoj nelineárních hyperelastických materiálových modelů probíhá od 2. pol. 20. století. Tyto modely jsou založeny na definici vztahu pro potenciál deformační energie W . V průběhu posledních 60 let bylo různými autory postupně navrženo velké množství hyperelastických modelů. Tyto modely jsou nezávislé na rychlosti a historii deformace. V posledních letech jsou však publikovány práce zabývající se modelováním zahrnujícím i tyto efekty.

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 tato pozorování. Takové modely (např. *Polynomický*, *Mooney-Rivlin*, *Ogden*, *Yeoh*, *Gent*) jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam.

2.2 Hyperelastické materiálové modely

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

Polynomická funkce

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

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

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 %.

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 elastomerů. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci.

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

kde μ je počáteční smykový modul.

$$\mu = nkT \quad (3)$$

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

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

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

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (4)$$

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. 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.

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

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

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

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

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

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (6)$$

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

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

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (7)$$

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

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

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \\ & + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \\ & + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_1 - 3)^3 \end{aligned} \quad (8)$$

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

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 %.

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.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} I_1^i - 3^i \quad (9)$$

Kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750} \quad (10)$$

kde μ je počáteční smykový modul (stejně jako u modelu Neo-Hookean) a λ_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 λ_L rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. Model je vhodný pro deformaci do 300 %.

Gent

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

$$W = \frac{EI_m}{6} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (11)$$

kde E je počáteční modul pružnosti, který je pro nestlačitelné materiály 3μ . I_m je limitní hodnota členu $(I_1 - 3)$, analogická k λ_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 napěťově deformační odezvy.

Ogden

Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. Tento model je dnes široce používaný a poměrně dobře vystihuje chování elastomerů i při velkých deformacích.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 \quad (12)$$

kde μ_i a α_i jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu (μ_i mají však obecně význam počáteční tuhosti). Za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Pro $N = 1$ a $\alpha_1 = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro $N = 2$, $\alpha_1 = 2$ a $\alpha_2 = -2$ Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden může být obecně aplikován pro deformaci do 700 %.

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 tvarů W_{vol} používaných v uvedených modelech:

$$W_{vol} = \frac{K}{2} J - 1^2 \quad (13)$$

$$W_{vol} = \frac{K}{4} J - 1^2 + \ln J^2 \quad (14)$$

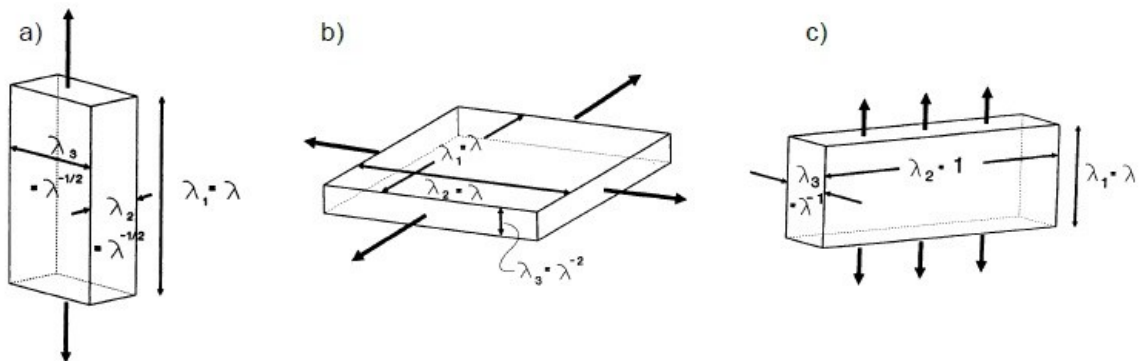
$$W_{vol} = K J \ln J - J + 1 \quad (15)$$

$$W_{vol} = \frac{9K}{2} \left(J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2, W_{vol} = \frac{K}{2} \left(\frac{J-1}{2} - \ln J \right) \quad (16)$$

2.3 Stanovení materiálových konstanty pro hyperelastické modely

Jednoduché lineární modely jsou založeny na modulu pružnosti a Poissonově konstantě. Tyto parametry lze stanovit poměrně jednoduše na standardních sériově vyráběných zařízeních. Avšak, pro stanovení materiálových konstant nelineárních hyperelastických modelů je nutno v materiálu dosáhnout i dalších módů namáhání. Pro tento způsob zatížení jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení.

Abychom získali přesné parametry do hyperelastických modelů musíme materiál zkoušet v jednoosém tahu, dvouosém tahu a čistém smyku (obr. 25). 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.



Obr. 25 a) jednoosý tah, b) dvouosý tah, c) čistý smyk

Jednoosý tah lze testovat na univerzálních zkušebních strojích. V tomto případě je vzorek materiálu roztahován ve směru jediné osy (obr. 25a).

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, vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem, roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů (obr. 25b) nebo roztahováním kruhového vzorku radiálně ve

směru od středu. Čistého smyku lze v tělese dosáhnout natahováním podélného vzorku, jehož výška je alespoň 10x menší než jeho šířka (obr. 25c). [6]

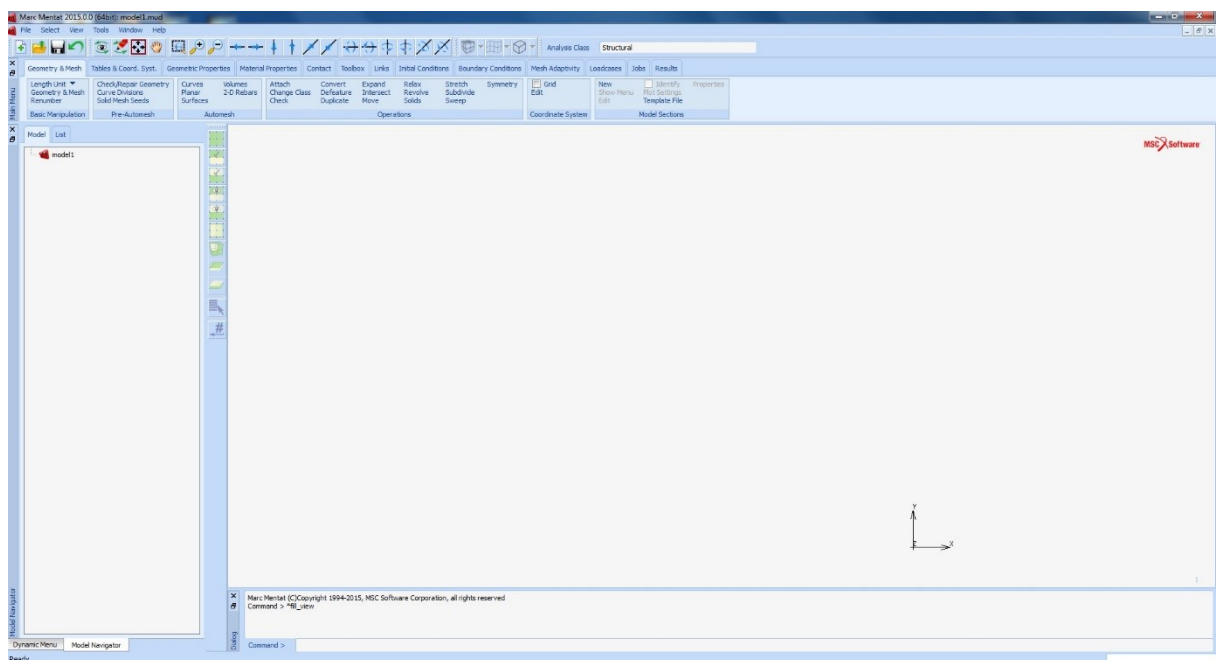
3 MARC MENTAT

Marc mentat kombinuje a poskytuje kompletní řešení (předběžné zpracování, řešení a následné zpracování) pro implicitní nelineární FEA. Marc poskytuje nejjednodušší a nejsilnější možnosti kontaktů, velkých napětí a multifyzikálních analýz, které jsou dnes k dispozici pro řešení statických a kvazistatických nelineárních problémů.

Marc nemá žádné omezení. Byl vyroben k řešení nelineárních problémů, Marc využívá pokročilou matematiku a FE technologie k tomu, aby neustále získal konvergovaná řešení pro vysoce nelineární problémy zahrnující nelineární materiály, velké zatížení, posunutí a kontakty. Marc je výkonný, obecně účelný pro řešení nelineárních analýz konečných prvků, které přesně simuluje chování produktu při statických, dynamických a multifázických zatěžovacích scénářích. Marcova všestrannost při modelování nelineárních materiálových chování a přechodných podmínek prostředí je ideální k vyřešení složitých problémů s konstrukcí.

Marc je ideální pro výrobce výrobků, kteří hledají robustní nelineární řešení. Má schopnosti elegantně simulovat všechny druhy nelinearity, a to geometrickou, materiálovou a hraniční stavovou nelinearitu, včetně kontaktu. Je také jediným komerčním řešením, které má robustní simulaci výroby a simulaci testování produktu, se schopností předpovědět poškození, selhání a šíření trhlin. V kombinaci s multifyzikálními schopnostmi, které vám pomohou propojit tepelné, elektrické, magnetické a strukturní analýzy, je Marc kompletní řešení, které dokáže řešit všechny vaše nelineární požadavky na simulaci. [8] [9]

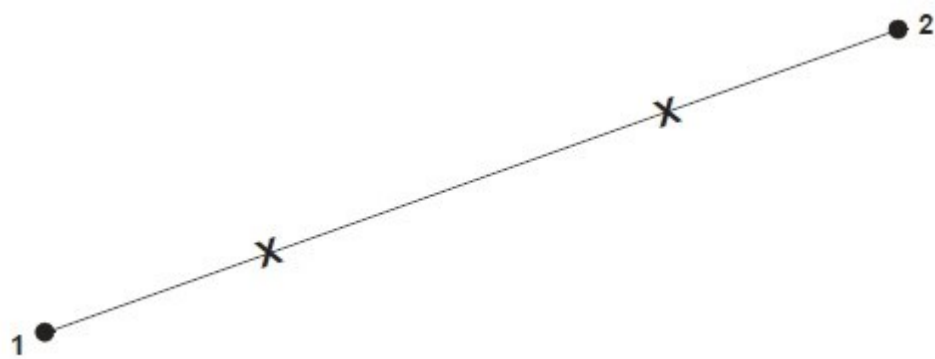
Z výše uvedené oficiální citace produktu Marc mentat je zřejmé, že pro vyhodnocení diplomové práce je daný program vhodným výběrem.



Obr. 26 Pracovní plocha programu Marc Mentat 2015

3.1 Funkce Rebar

Prvek Rebar je tvořen 2-uzlovou čarou, do které se mohou umísťovat deformační prvky jako např. výztužné tyče nebo šňůry. Jednotlivé elementy je poté možné spojit se 4-uzlovými symetrickými prvky kontinua pro reprezentaci kompozitního materiálu. Síť pro tento výztužný prvek může být odlišná od sítě kontinua. Vkládání výztuží se používá k vynucení kompatibility mezi dvěma sítěmi. Tato technika umožňuje přesné zastoupení výztuže a výplně (použití např. při vyztužení betonu tyčemi). Předpokládá se, že jednotlivé vrstvy reprezentují výztuže. Počet vrstev se zadává pomocí funkce Rebar, nebo je možné je použít z podporovaného programu. Počet maximálních vrstev výztuže v programu Marc mentat je 5, uvnitř prvku. Prvek je integrován pomocí číselného schématu založeného na Gaussově kvadrantu. Každá vrstva obsahuje dva body integrace, kde každý bod má zadanou pozici, tloušťku (případně rozteč a plochu průřezů. [11]



Obr. 27 Rebar

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 MATERIÁLOVÉ HODNOTY ELASTOMERU

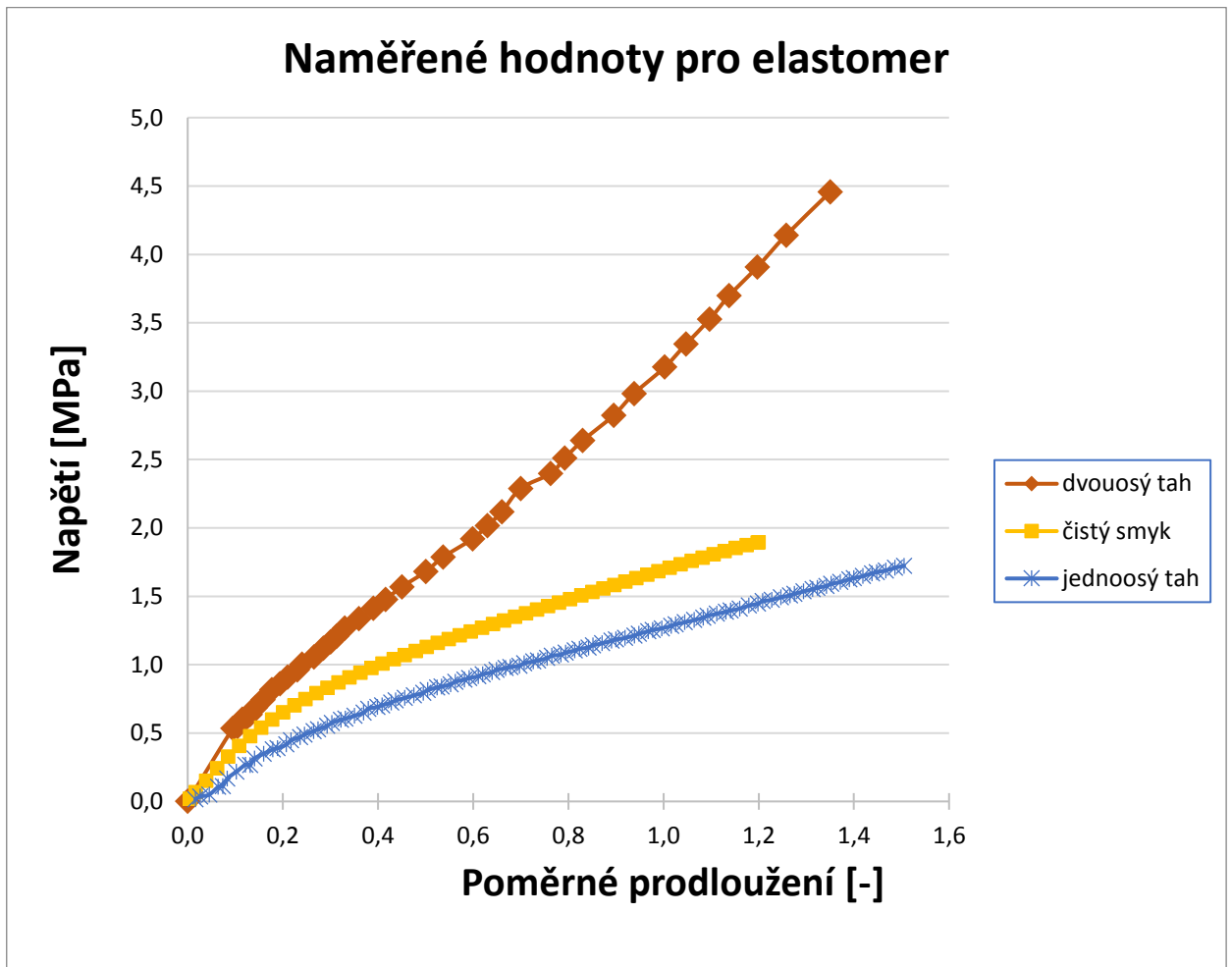
Níže zvolená data budou použita pro materiál gumy a následně vyhodnocována pro různé hyperelastické modely.

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro elastomer

Dvousý tah		Čistý smyk		Jednoosý tah	
Poměrné prodloužení [-]	Napětí [MPa]	Poměrné prodloužení [-]	Napětí [MPa]	Poměrné prodloužení [-]	Napětí [MPa]
0,0000	0,0000000000	0,004133217	0,018554973	0,016120	0,015000
0,0950	0,5341463415	0,017164173	0,066560576	0,026280	0,035718
0,1050	0,5484573171	0,038516869	0,149554528	0,045080	0,049212
0,1150	0,5996524390	0,061701915	0,241646175	0,064080	0,105568
0,1310	0,6358978537	0,084894263	0,328128164	0,073640	0,111918
0,1424	0,6866102634	0,108076697	0,405764212	0,083200	0,167479
0,1583	0,7435720976	0,131268522	0,475848777	0,102320	0,217485
0,1766	0,8169621659	0,154455651	0,539173031	0,121520	0,268285
0,1940	0,8612525854	0,177645911	0,597391077	0,131040	0,264316
0,2100	0,9081492683	0,200838773	0,650934396	0,140640	0,314322
0,2300	0,9609600000	0,224021746	0,700594095	0,159760	0,348453
0,2400	1,0027668293	0,247210959	0,747089427	0,178840	0,380202
0,2650	1,0563984146	0,270400690	0,790492247	0,188360	0,388140
0,2850	1,1188902439	0,293590442	0,831270061	0,207440	0,415921
0,3000	1,1661000000	0,316776006	0,869782397	0,217000	0,446083
0,3130	1,2079279756	0,339966774	0,906568681	0,236040	0,470689
0,3300	1,2674575610	0,363153914	0,941628975	0,245600	0,488151
0,3600	1,3366478049	0,386342090	0,975610486	0,264560	0,514344
0,3900	1,4107821951	0,409528691	1,008117628	0,274080	0,527838
0,4156	1,4767815415	0,432720516	1,039510059	0,293120	0,552444
0,4500	1,5685463415	0,455908153	1,070291148	0,302760	0,573875
0,5000	1,6800000000	0,479093759	1,100137419	0,321880	0,596894
0,5364	1,7852968000	0,502286621	1,129516122	0,331440	0,604831
0,5986	1,9201915317	0,525469573	1,158391329	0,350600	0,626262
0,6300	2,0151570732	0,548660859	1,186583402	0,369680	0,648487
0,6600	2,1178765854	0,571846962	1,214379889	0,379320	0,677061
0,7000	2,2882439020	0,595034599	1,241996611	0,398600	0,690555
0,7628	2,3979239415	0,618224351	1,269325658	0,408280	0,702461
0,7924	2,5105840780	0,641415140	1,296187264	0,427440	0,723098
0,8300	2,6376102439	0,664602777	1,322833049	0,437040	0,738180
0,8951	2,8231905585	0,687789378	1,349191159	0,456240	0,756436
0,9380	2,9821093171	0,710982281	1,375369503	0,475520	0,774692
1,0025	3,1754765854	0,734162621	1,401439937	0,494840	0,794535
1,0470	3,3432502683	0,757357556	1,427546299	0,504560	0,814379

1,0968	3,5251810732	0,780544198	1,453365113	0,523840	0,832635
1,1378	3,6977161610	0,803733411	1,479183799	0,533440	0,838985
1,1969	3,9074813561	0,826925775	1,505038541	0,552640	0,856447
1,2574	4,1399614829	0,850111339	1,530641534	0,562240	0,874703
1,3500	4,4556000000	0,873301548	1,556064763	0,581560	0,890578
1,4400	4,7650819512	0,896487692	1,581487863	0,591200	0,900897
		0,919677900	1,607054929	0,610480	0,915184
		0,942861889	1,632334319	0,620160	0,930265
		0,966051682	1,657685565	0,639400	0,944552
		0,989239817	1,682857045	0,649080	0,961221
		1,012433177	1,708136435	0,668280	0,974715
		1,035617745	1,732948257	0,678000	0,982652
		1,058805383	1,757760207	0,697280	0,991383
		1,081997747	1,782068661	0,707000	1,010433
		1,105180160	1,805765708	0,726360	1,023133
		1,128374100	1,828959515	0,736040	1,031070
		1,151556015	1,851757608	0,755280	1,047739
		1,174748877	1,873261289	0,765000	1,065201
		1,197936514	1,892463566	0,784320	1,073139
		1,199388007	1,893650196	0,794040	1,087426
				0,813320	1,103301
				0,822920	1,115207
				0,842160	1,125525
				0,851760	1,141400
				0,871040	1,155688
				0,890280	1,174737
				0,900000	1,183469
				0,919280	1,195375
				0,938600	1,212837
				0,948280	1,225537
				0,967560	1,243793
				0,977200	1,253318
				0,996520	1,265224
				1,015840	1,283480
				1,025480	1,295386
				1,044760	1,309673
				1,064080	1,325548
				1,083360	1,343011
				1,092960	1,357298
				1,112080	1,371585
				1,131240	1,387460
				1,140840	1,395398
				1,160000	1,409685
				1,179160	1,431910
				1,198320	1,446197
				1,208000	1,463659

	1,227160	1,473978
	1,246320	1,492234
	1,265480	1,505728
	1,275080	1,517634
	1,294240	1,535096
	1,313400	1,551765
	1,323040	1,562083
	1,342320	1,575577
	1,351960	1,589864
	1,371120	1,604152
	1,390280	1,623995
	1,399880	1,631932
	1,419000	1,647807
	1,438200	1,667651
	1,447840	1,676382
	1,466960	1,688288
	1,486200	1,708132
	1,505400	1,722419

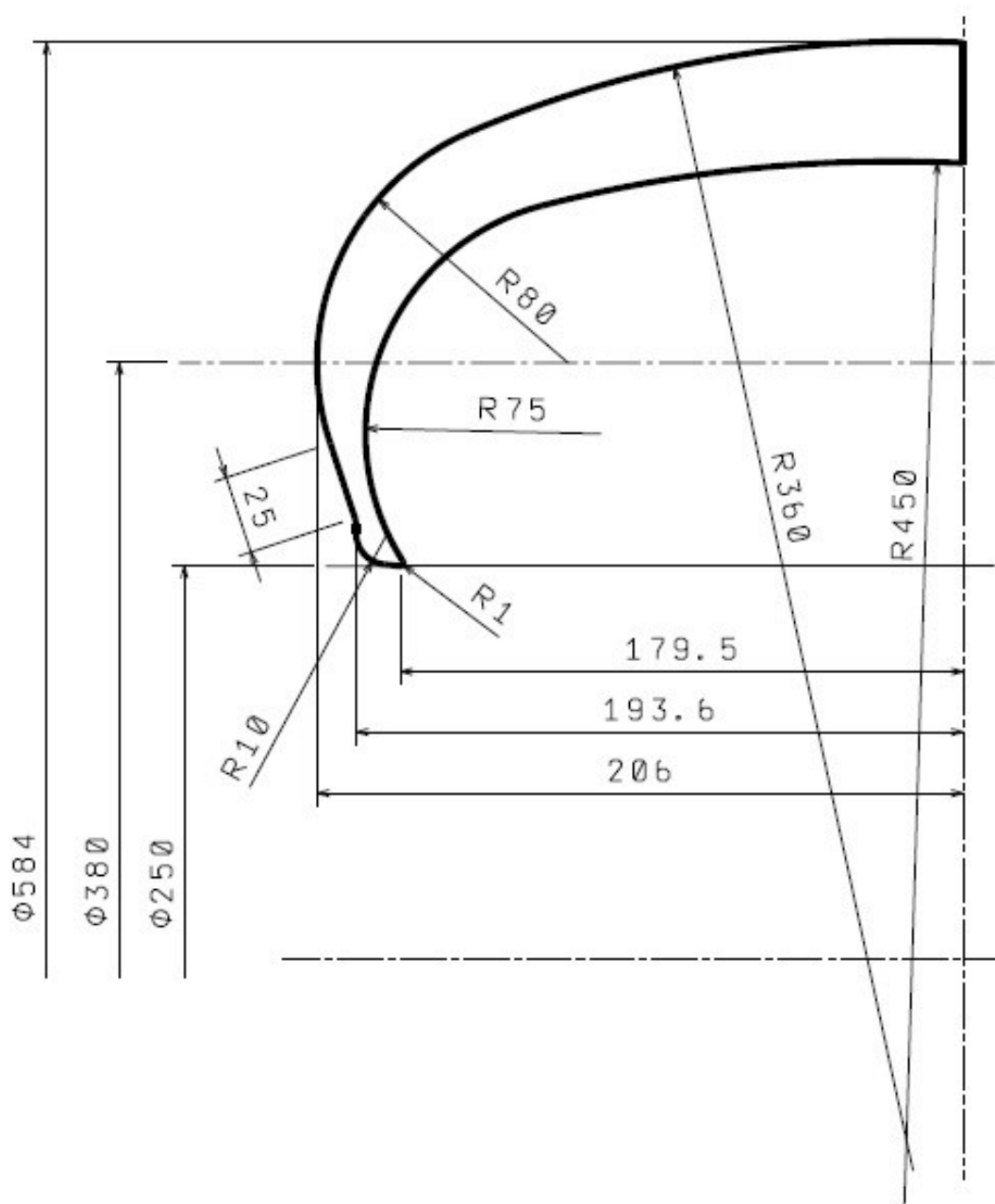


Obr. 28 Graf naměřených hodnot pro jednoosý tah, dvouosý tah a čistý smyk

5 NASTAVENÍ MODELU PNEUMATIKY

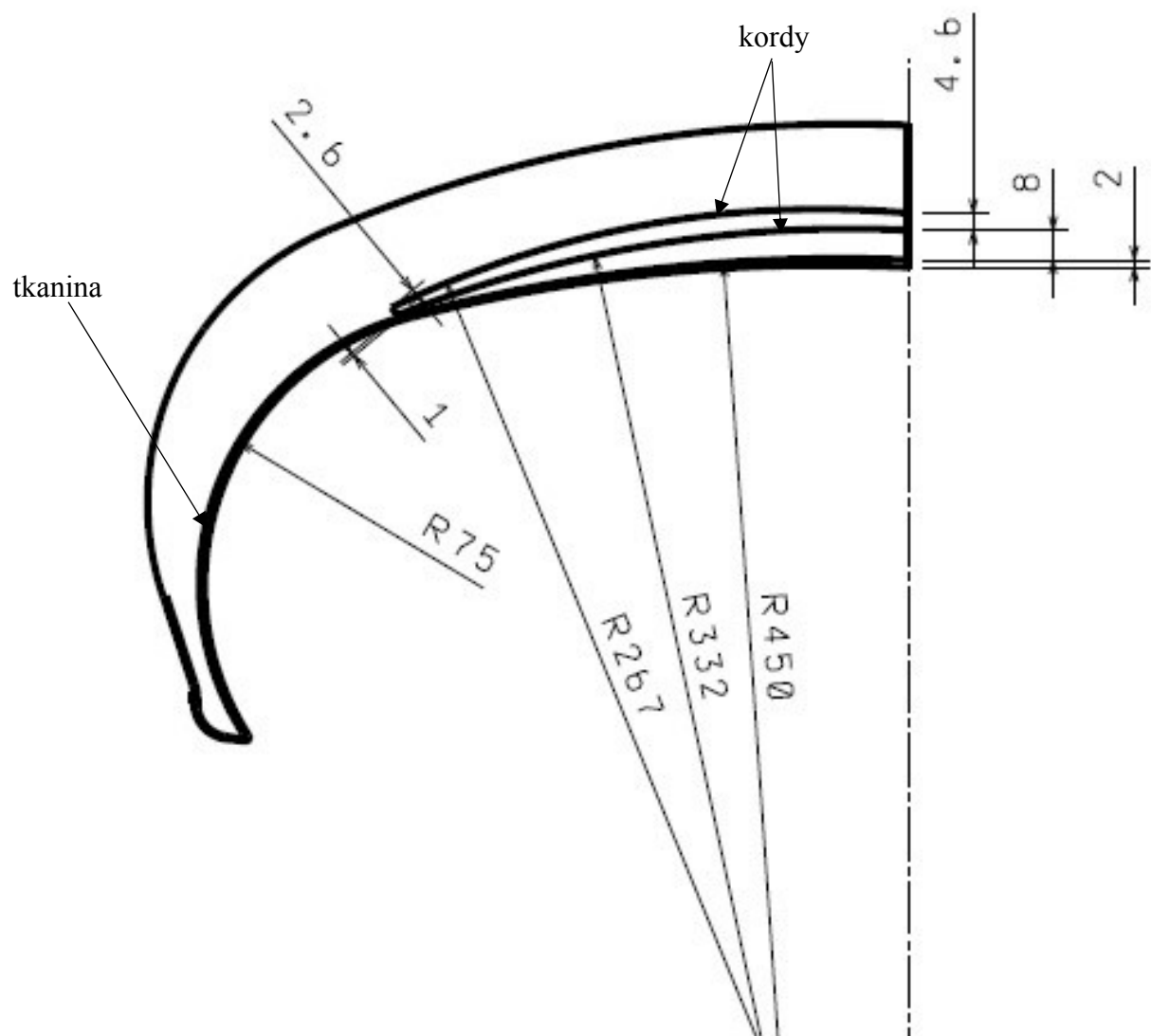
5.1 Model pneumatiky

Níže je náčrt s rozměry pneumatiky, jež byla dále používána v Diplomové práci. Pneumatika byla vyhotovena ve 2D programu Catia V5R19. Vzhledem k symetrii dané úlohy, byla vyhotovena pouze polovina pneumatiky.



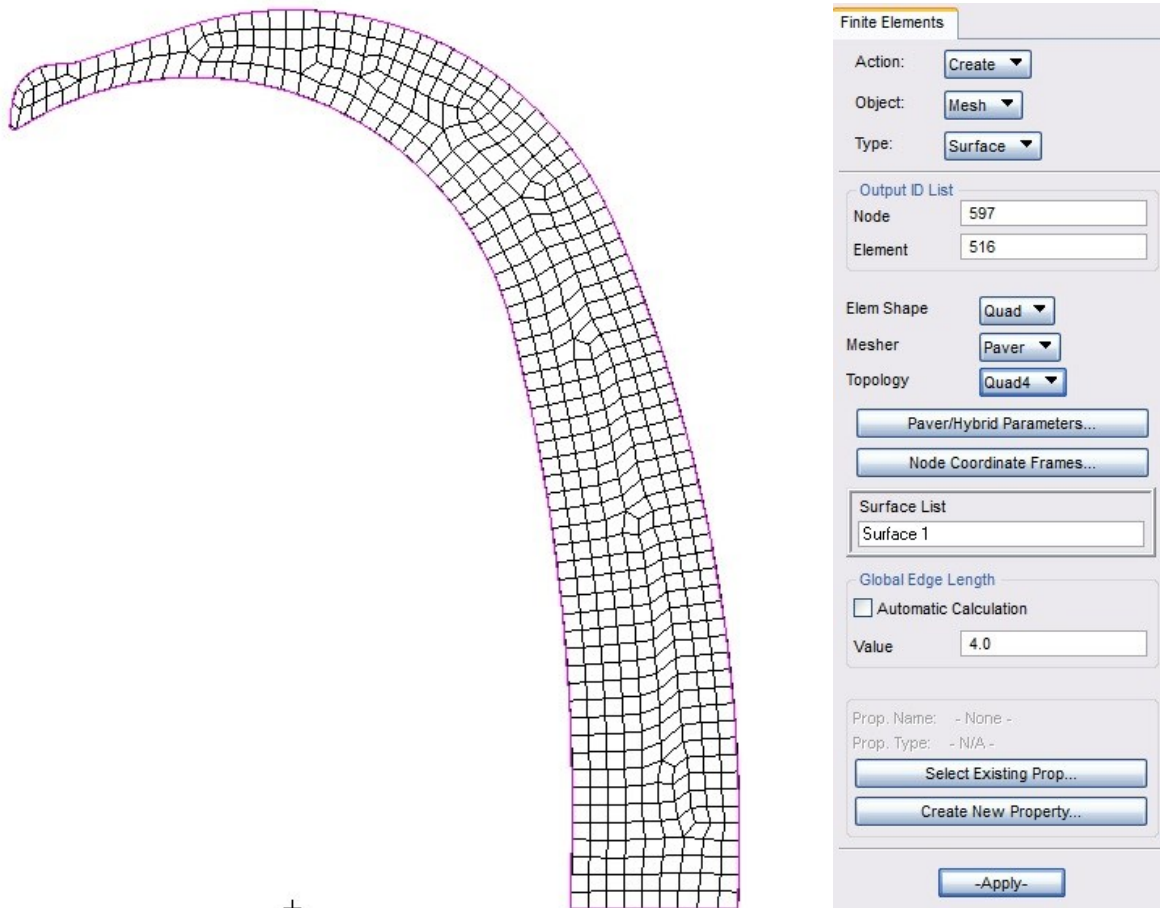
Obr. 29 Náčrt pneumatiky

Do modelu pneumatiky byly následně přidány výztuhy.



Obr. 30 Náčrt pneumatiky s vyznačenými výztuhami

Daný model pneumatiky byl následně uložen ve formátu IGES. V programu Patran 2016 byla následně vyhotovena síť elementů a uzlů.



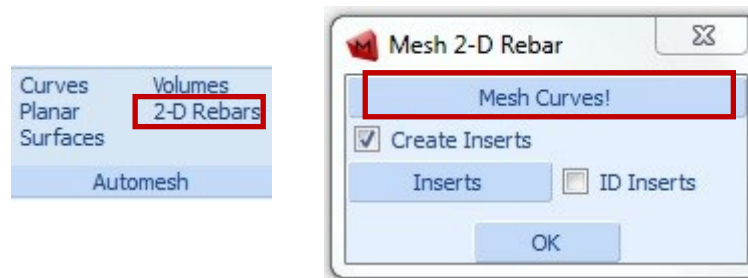
Obr. 31 Vysíťovaný model pneumatiky

Za tvar elemente sítě byl zvolen obdélníkový průřez Quad4, s velikostí hrany elementu 4.

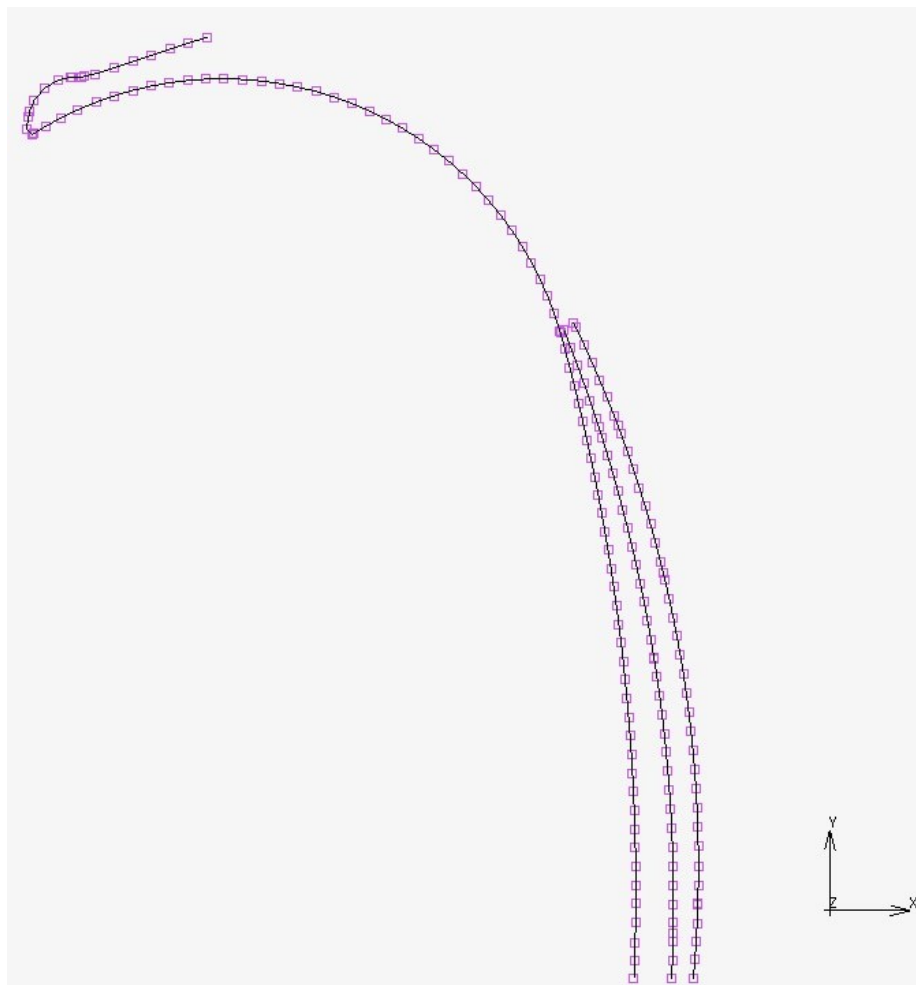
Počet uzlů sítě – 597

Počet elementů sítě- 516

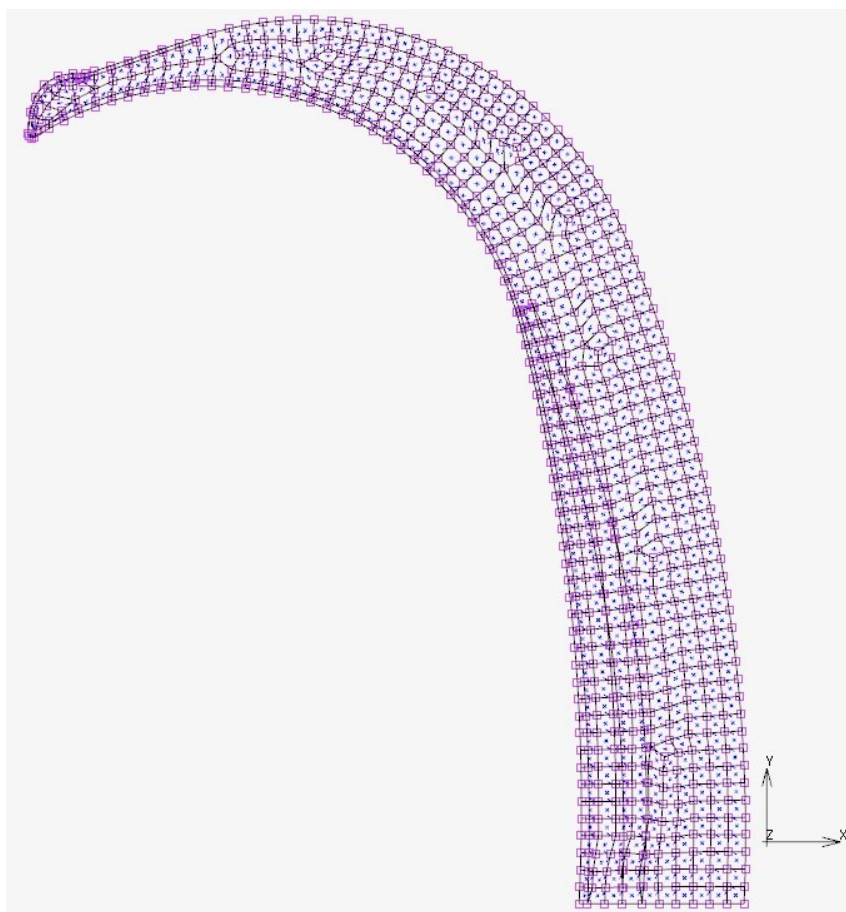
Dále byly v programu Marc mentat 2015 vyhotoveny elementy na čarách výztuh, které byly vloženy pomocí příkaze Automesh – 2-D Rebars.



Obr. 32 Mesh 2-D Rebar



Obr. 33 Vysíťovaný model výztuh

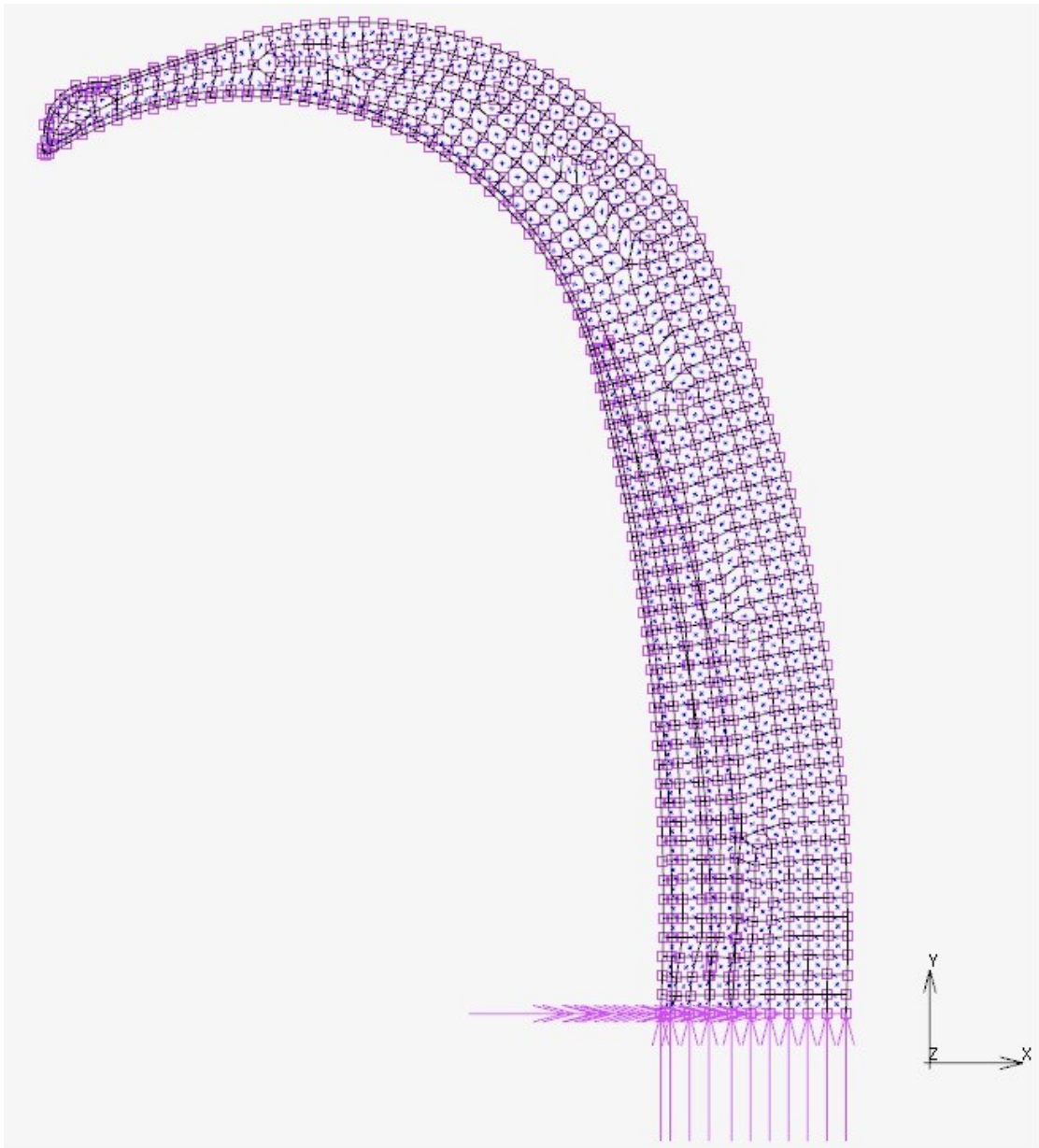


Obr. 34 Vysíťovaný model

5.2 Okrajové podmínky

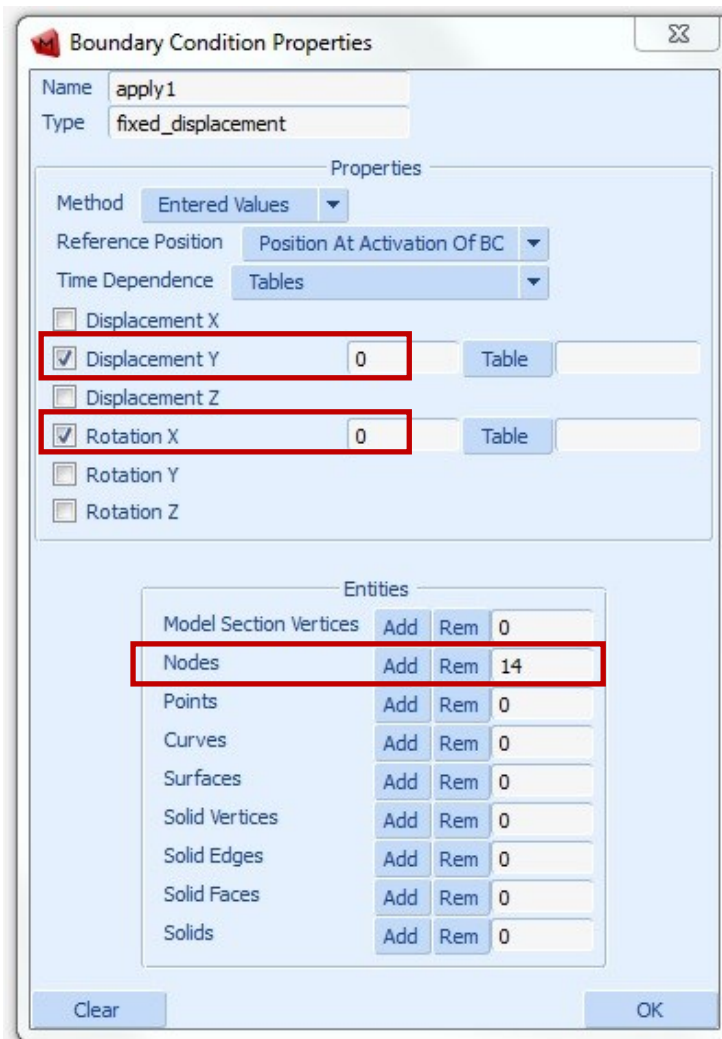
5.2.1 Nastavení uchycení

V dalším kroku byly v programu MARC Mentat 2015 nastaveny okrajové podmínky uchycení.



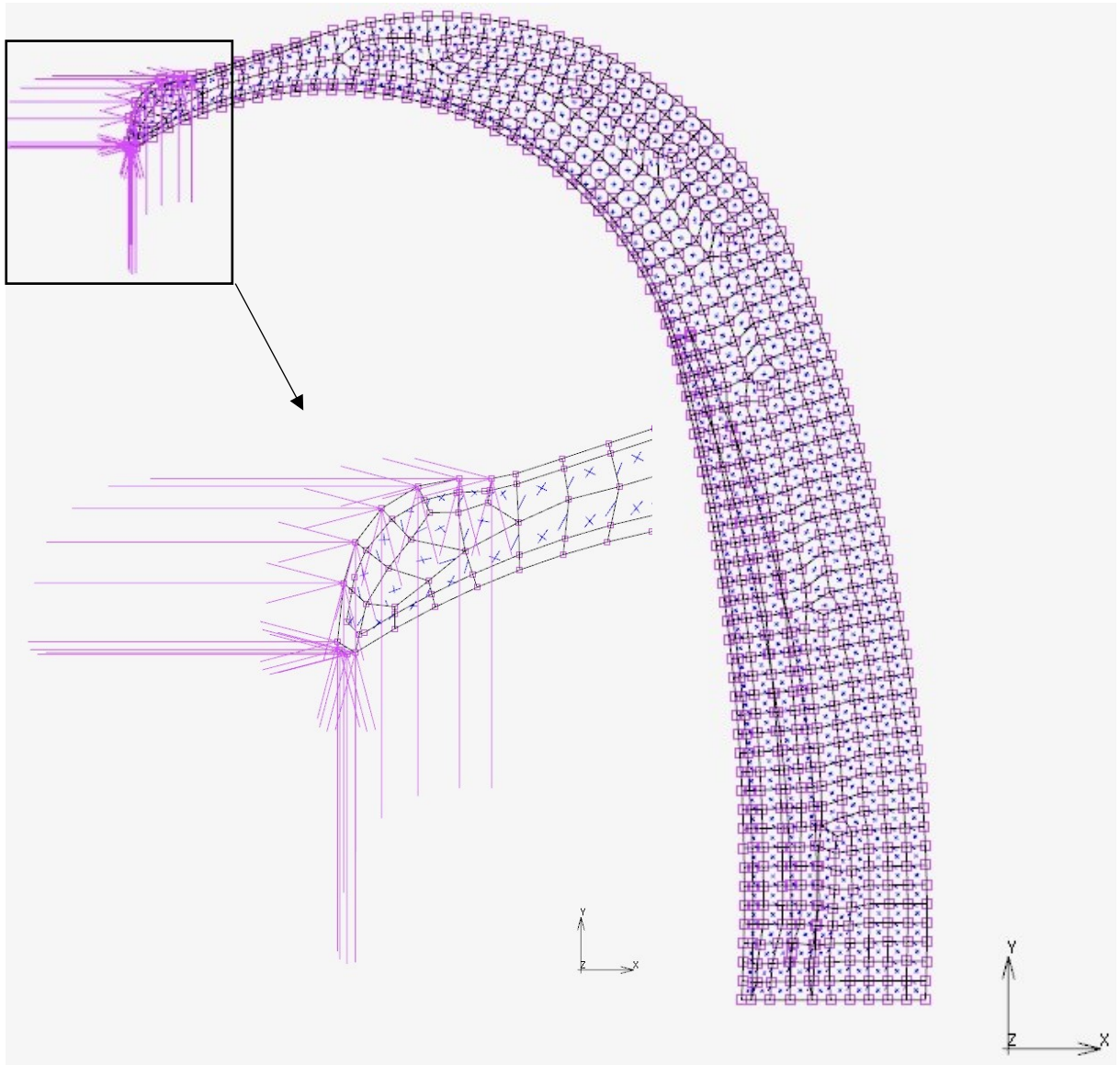
Obr. 35 Okrajová podmínka 1

V místě symetrie pneumatiky byla navržena podmínka zabránění posunutí v ose Y a rotace kolem osy X. Následně byly vybrány uzly pro danou podmínku.



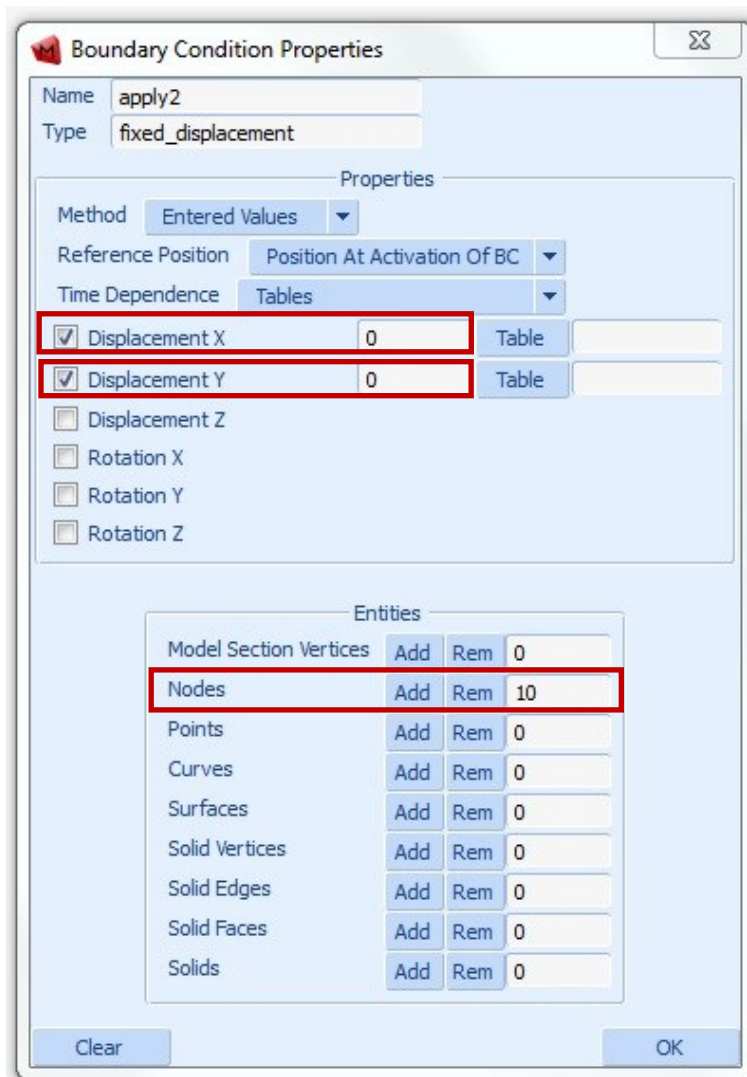
Obr. 36 Nastavení okrajové podmínky 1

Následovalo nastavení druhé okrajové podmínky v místě styku pneumatiky s ráfkem.



Obr. 37 Okrajová podmínka 2

Zde byla nastavena podmínka zabránění posunutí v ose X a Y. Dále byly vybrány uzly pro danou podmínku.



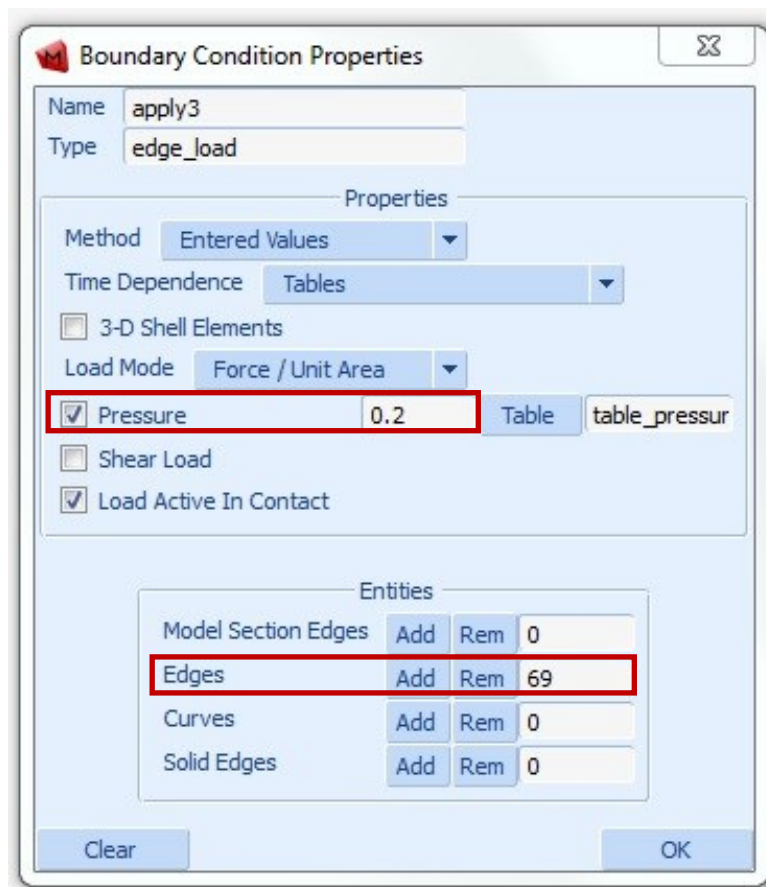
Obr. 38 Nastavení okrajové podmínky 2

5.2.2 Nastavení tlaku



Obr. 39 Okrajová podmínka 3

Třetí okrajová podmínka se týkala tlakového zatížení uvnitř pneumatiky, jež bylo nastaveno na hodnotu $0,2 \text{ MPa} = 2 \text{ bar}$. Dále byly vybrány hrany, na které působí tlak.



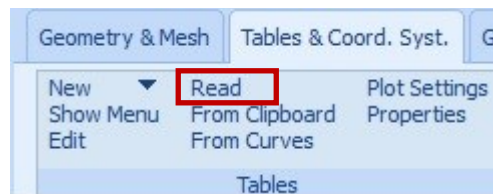
Obr. 40 Nastavení okrajové podmínky 3

5.2.3 Nastavení materiálů

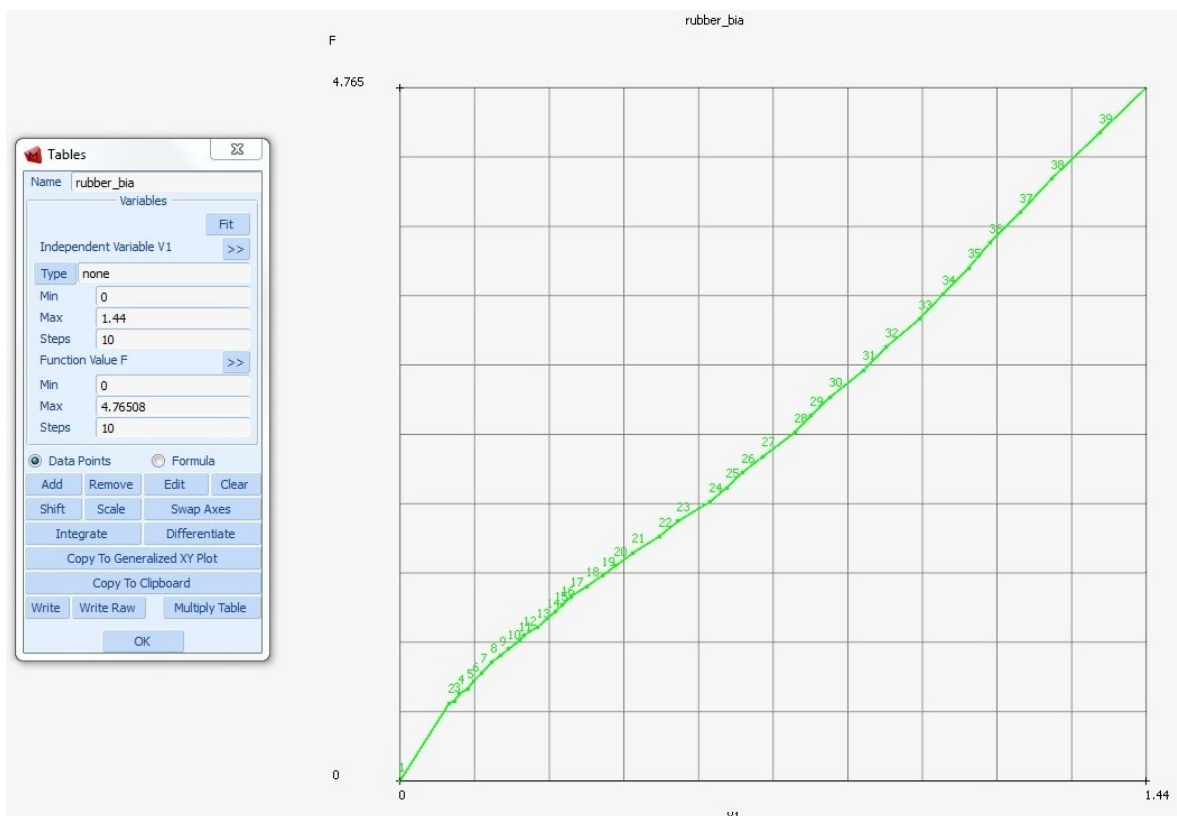
Celková pneumatika se v daném případě skládá z tří materiálů:

- 1) guma
- 2) ocelové kordy
- 3) textilní tkanina

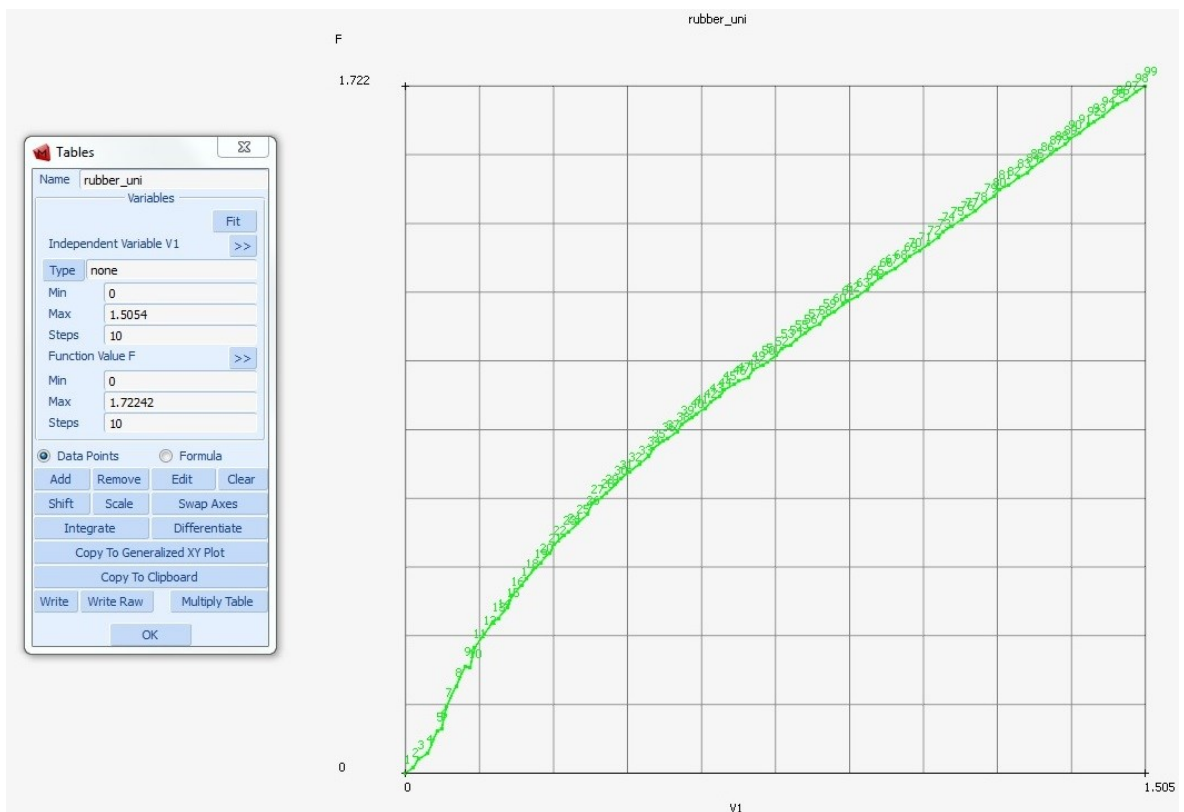
K nastavení materiálu gumy bylo použito naměřených hodnot jednoosého tahu, dvouosého tahu a čistého smyku, které byly do programu naimportovány pomocí příkazu Read.



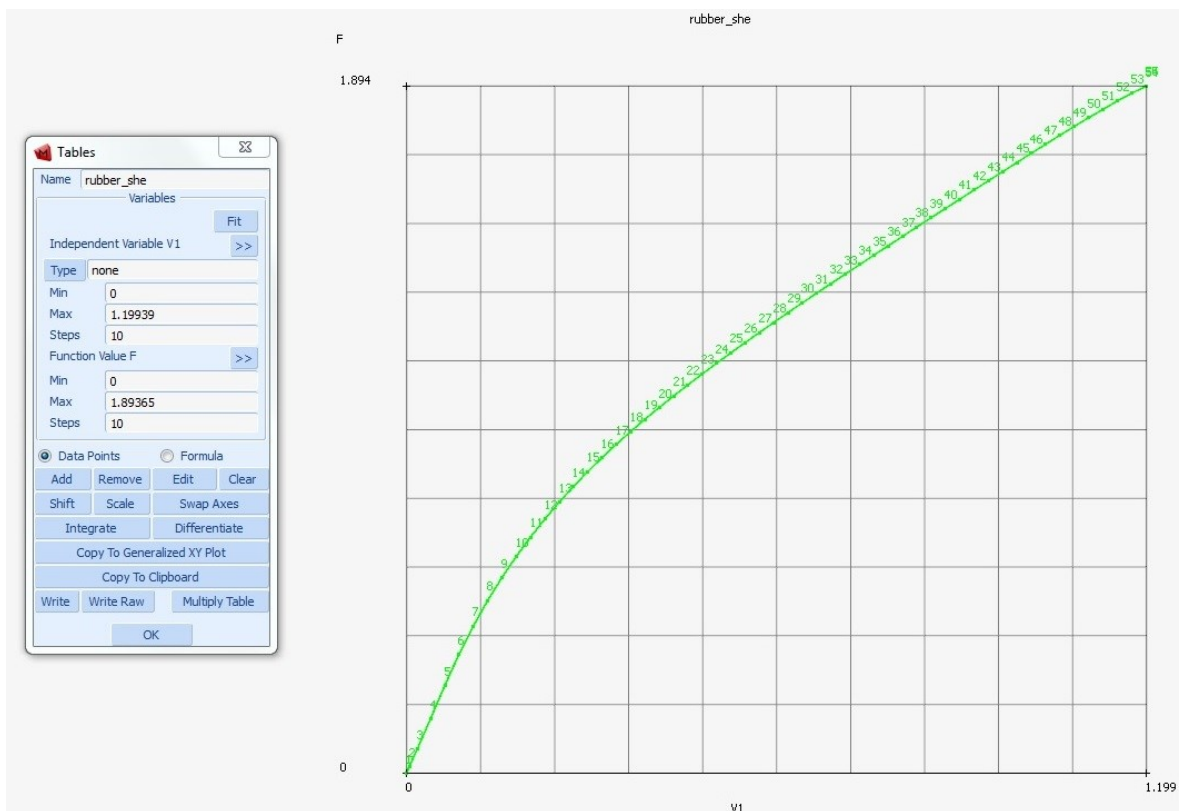
Obr. 41 Tables



Obr. 42 Table biaxial



Obr. 43 Table uniaxial

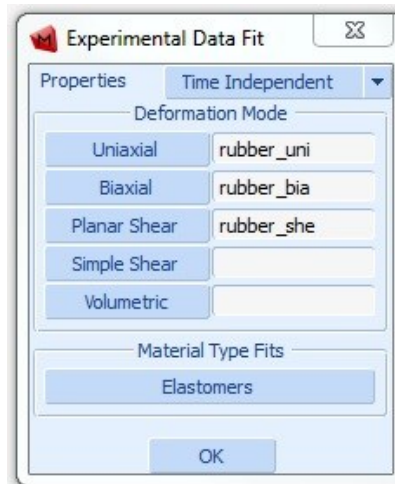


Obr. 44 Table planar shear

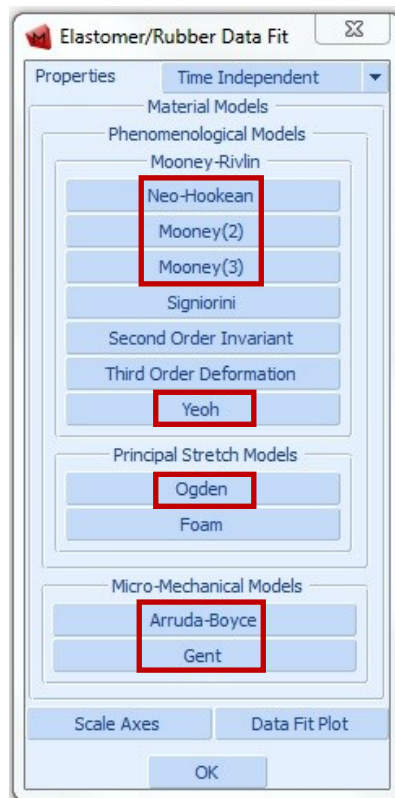
Materiál gummy byl následně do programu vložen pomocí naměřených dat přes příkaz Experimental Data Fit.



Obr. 45 Material Properties

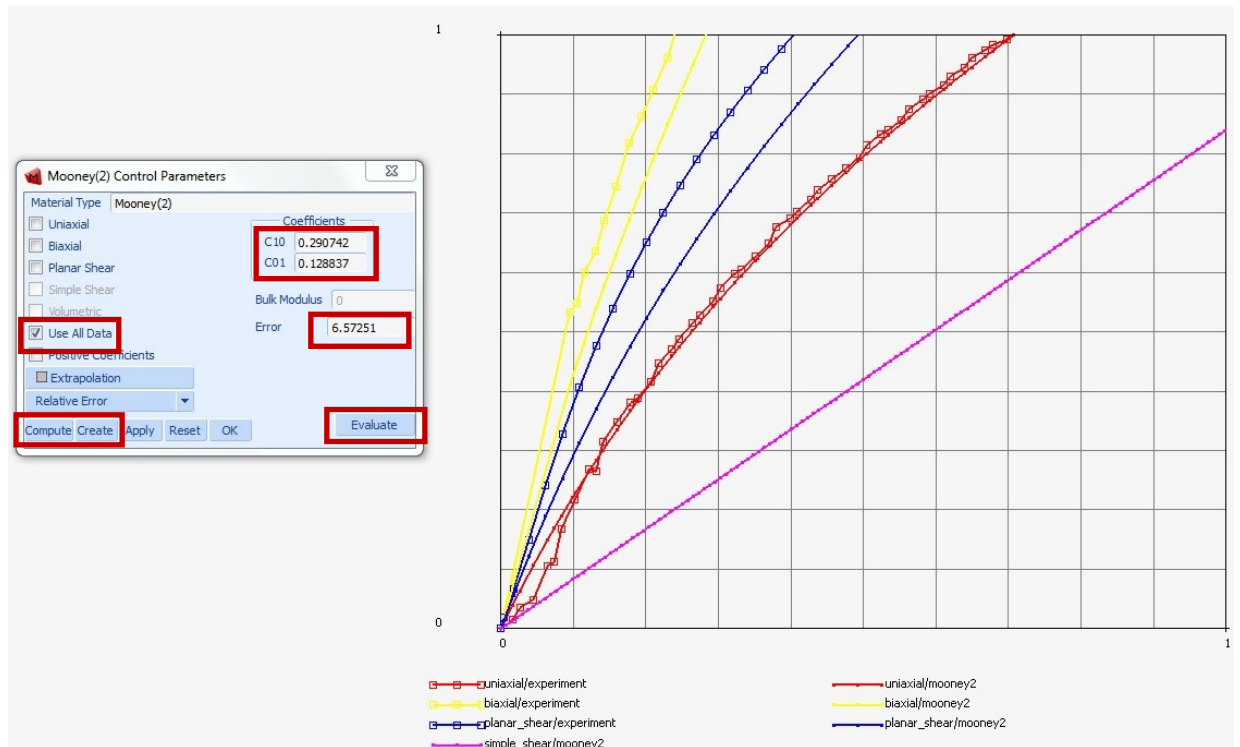


Obr. 46 Exp. data fix



Obr. 47 Elastomer data fit

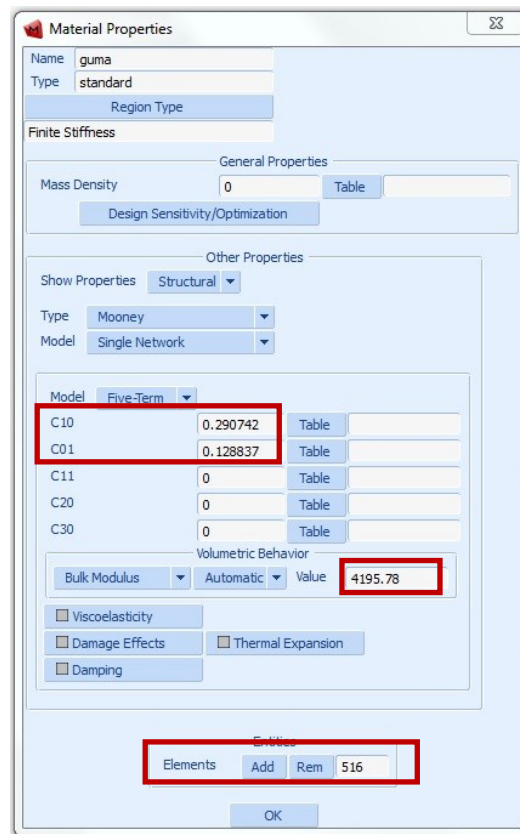
Pro základní nastavení byl zvolen materiálový model dvouparametrový Mooney. Další zvýrazněné modely byly dále vybírány v průběhu Diplomové práce.



Obr. 48 Control parameters

Po zvolení modelu Mooney(2) a vybrání importovaných dat následovalo vypočítání koeficientů pro daný model a jejich chyby. Posléze byl vytvořen materiál gumy.

Na obrázku níže (obr. 47) jsou vidět zanesené vypočítané koeficienty, včetně vypočítaného objemového modulu pružnosti, který v daném případě nabývá hodnoty 4195 MPa. Následně byly vybrány elementy sítě vytvořené v programu Patran 2016.



Material Properties

Name: guma
Type: standard
Region Type: [Region Type]
Finite Stiffness: [Finite Stiffness]

General Properties
Mass Density: 0 [Table]
Design Sensitivity/Optimization: [Design Sensitivity/Optimization]

Other Properties
Show Properties: Structural
Type: Mooney
Model: Single Network

Model: Five-Term

C10	0.290742	[Table]
C01	0.128837	[Table]
C11	0	[Table]
C20	0	[Table]
C30	0	[Table]

Volumetric Behavior
Bulk Modulus: Automatic Value: 4195.78
 Viscoelasticity
 Damage Effects
 Thermal Expansion
 Damping

Elements: Add Rem 516
OK

Obr. 49 Nastavení materiálu gumy

Nastavení jednotlivých vrstev.

Tkanina – plocha 1 mm², modul pružnosti v tahu 6800 MPa, poissonův poměr 0,3

Kordy – plocha 0,25 mm², modul pružnosti v tahu 198 700 MPa, poissonův poměr 0,3

Pro kord 1 byl zadán úhel natočení 66°, kord 2 byl následně natočen o opačný úhel na hodnotu -66°.

Rel. Layer Position	0	Rebar Area	1
# Rebars / Length	1	Angle	0

Obr. 50 Rebar tkaniny

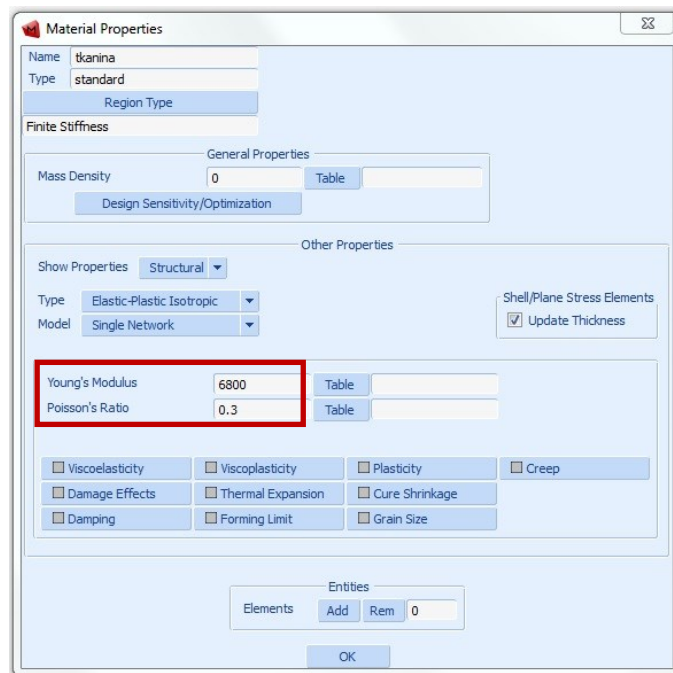
Rel. Layer Position	0	Rebar Area	0.25
# Rebars / Length	1	Angle	66

Obr. 51 Rebar kordu 1

Rel. Layer Position	0	Rebar Area	0.25
# Rebars / Length	1	Angle	-66

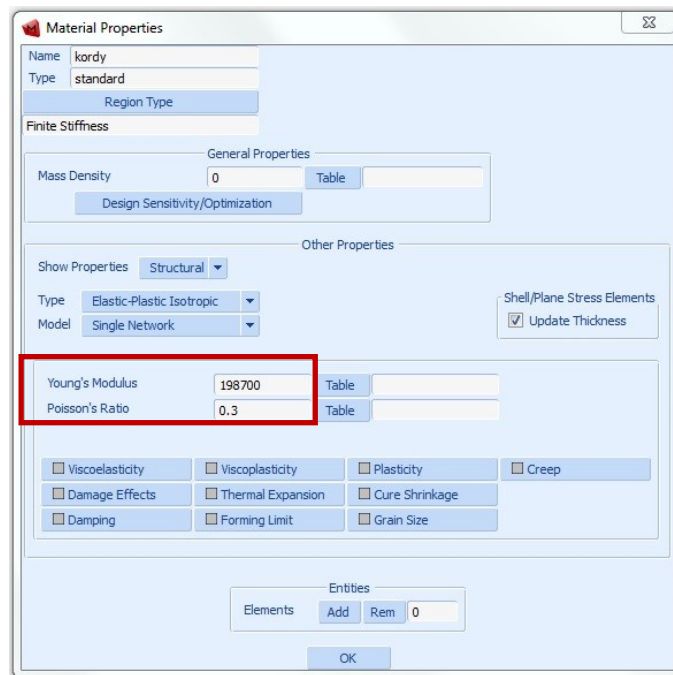
Obr. 52 Rebar kordu 2

Materiál tkaniny byl vytvořen pomocí záložky Material properties - New – Standard. Byly nastaveny hodnoty modulu pružnosti v tahu $E = 6800$ MPa, a Poissonův poměr 0,3. Poté byly vybrány elementy kordů.



Obr. 53 Nastavení materiálu tkanina

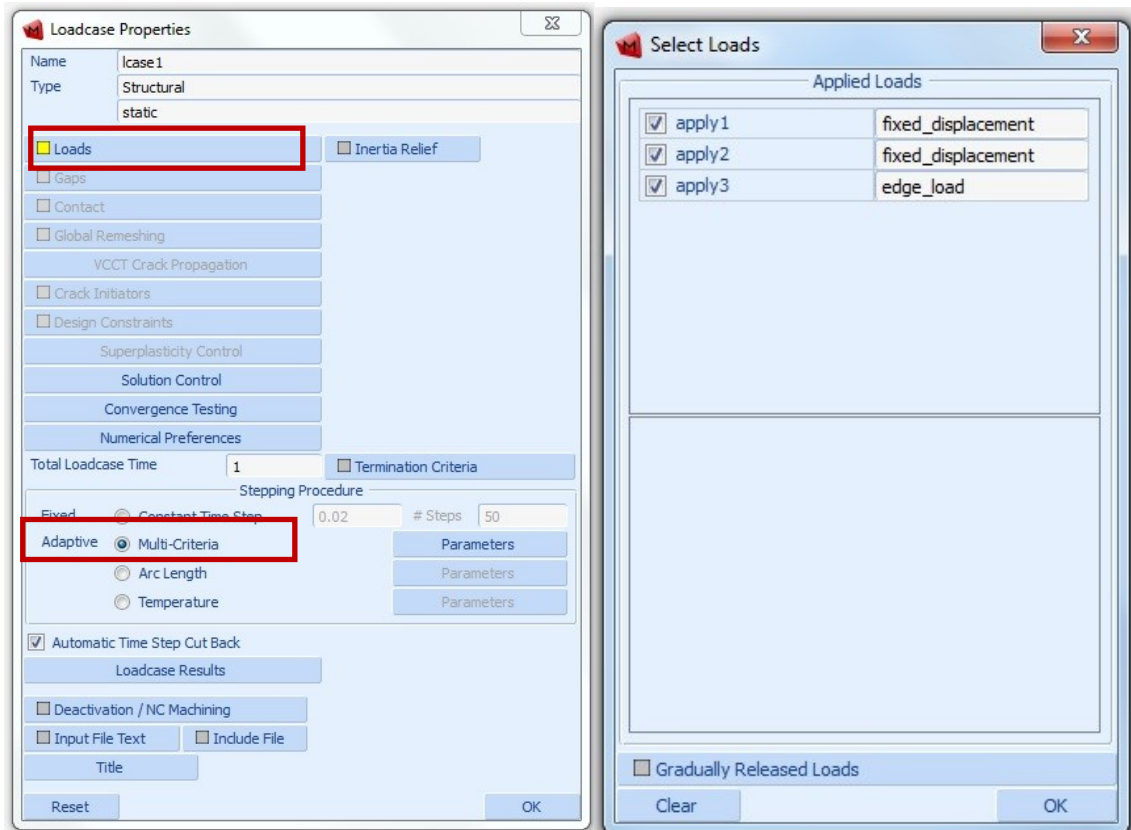
Materiál kordů byl nastaven na hodnoty Modulu pružnosti v tahu $E = 198700$ MPa, a Poissonův poměr 0,3. Dále byly vybrány elementy tkaniny.



Obr. 54 Nastavení materiálu kordy

5.2.4 Nastavení výpočtu

V nastavení zatěžovacího stavu (Loadcase) byly vybrány okrajové podmínky uchycení a zatížení tlakem. Za krokovou proceduru byla zvolena možnost Adaptive, Multi-Criteria.

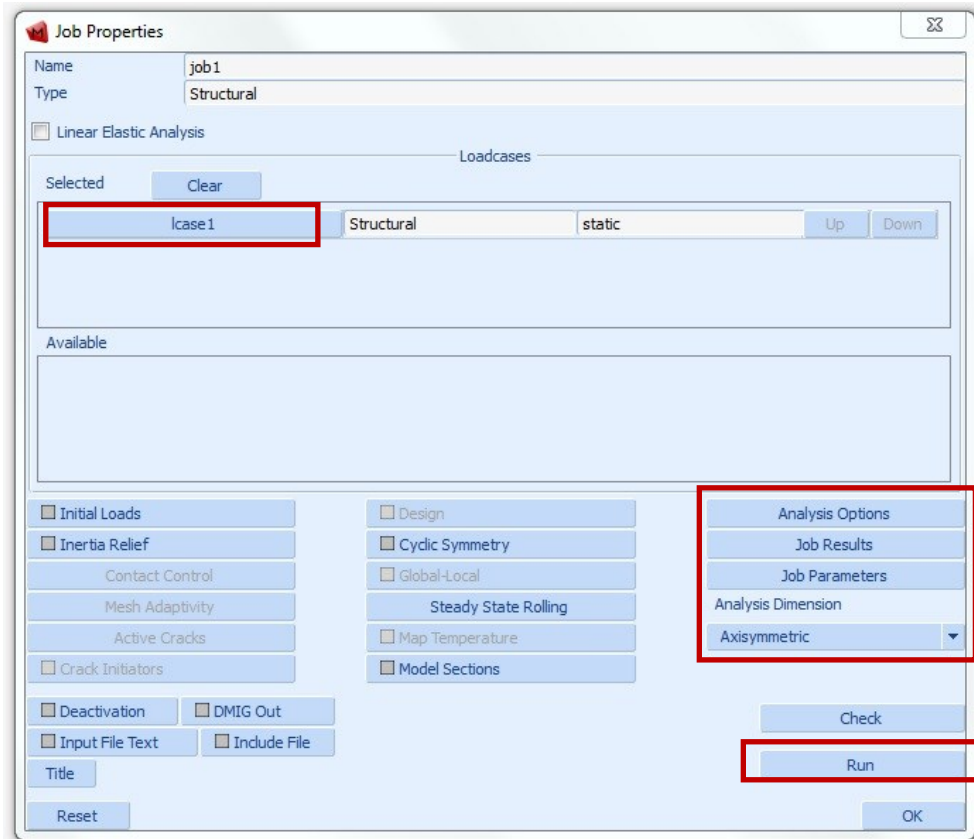


Obr. 55 Nastavení Loadcase

Dále byl vybrán nastavený Loadcase společně s podmínkou symetrie. Marc Mentat 2015 umožňuje symetrii pouze v X-ové ose. Tato podmínka byla splněna při zhotovení geometrie.

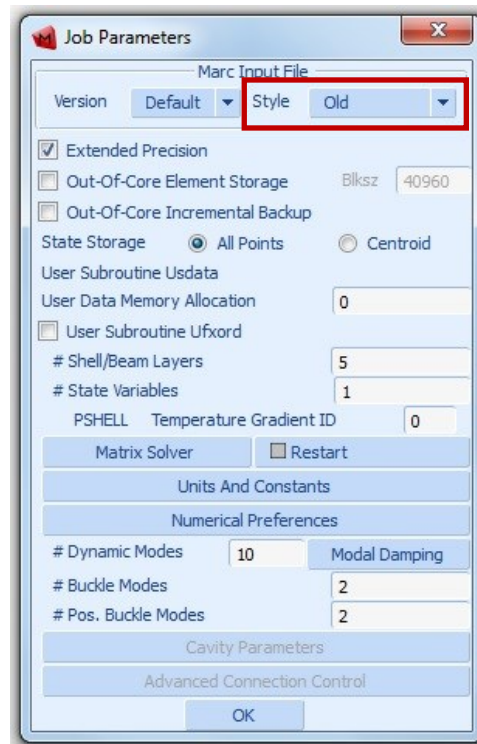
V dalším kroku bylo nastavení výpočtu, jež je v marc mentat 2015 označováno pod položkou Job.

Byly vybrány zvolené okrajové podmínky a vybrána podmínka osové symetrie.



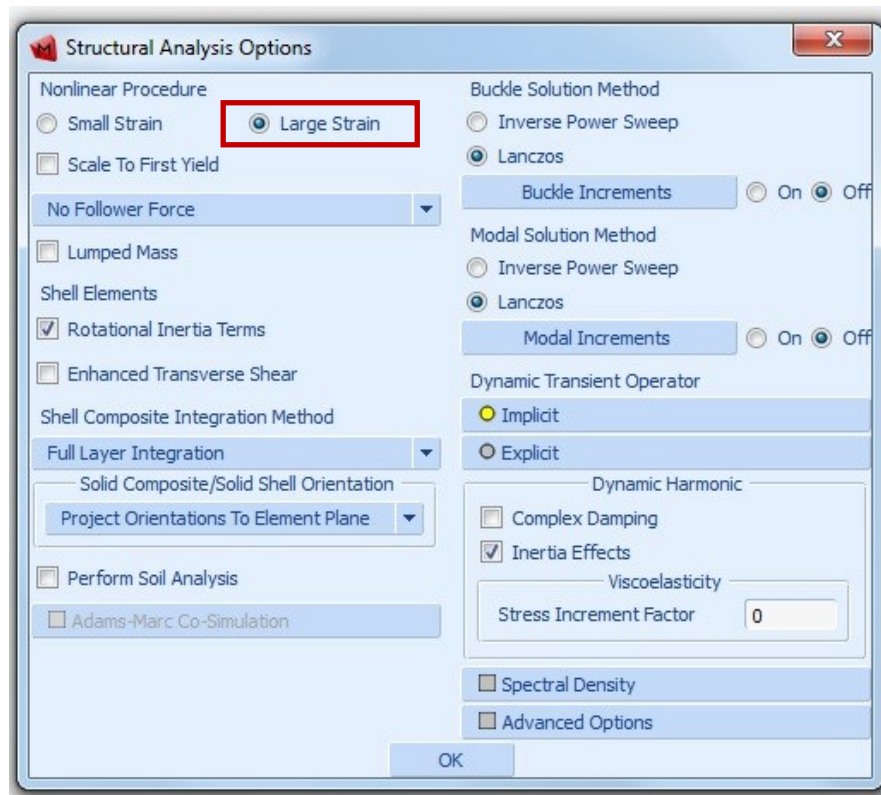
Obr. 56 Nastavení Job properties

V nastavení Job Parameters byl zvolena výstup výsledku na styl Old.

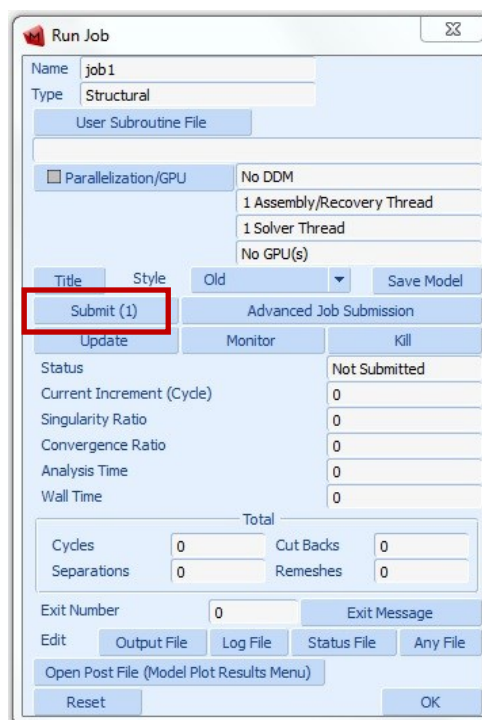


Obr. 57 Nastavení Job parameters

V posledním kroku bylo nastavení Analysis Options, kde byla zvolena Nonlinear Procedure – Large Strain a následovalo spuštění výpočtu příkazem Sumbit(1).



Obr. 58 Nastavení Analysis option



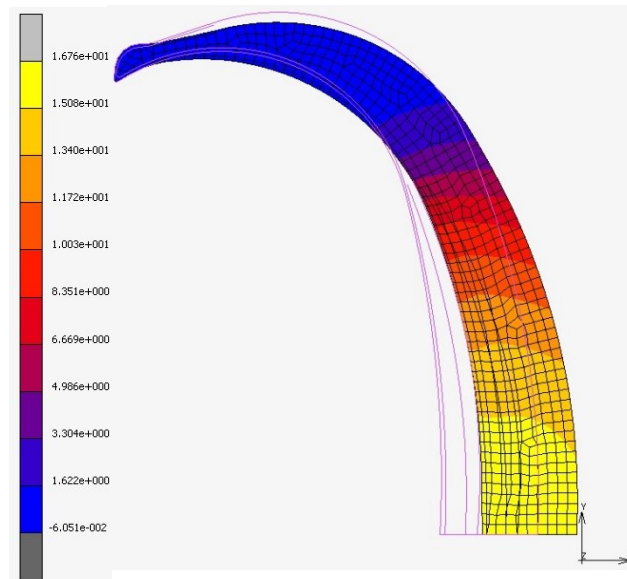
Obr. 59 Run job

5.3 Vybrané výsledky

Níže jsou vybrané výsledky analýzy.

Posunutí v ose x

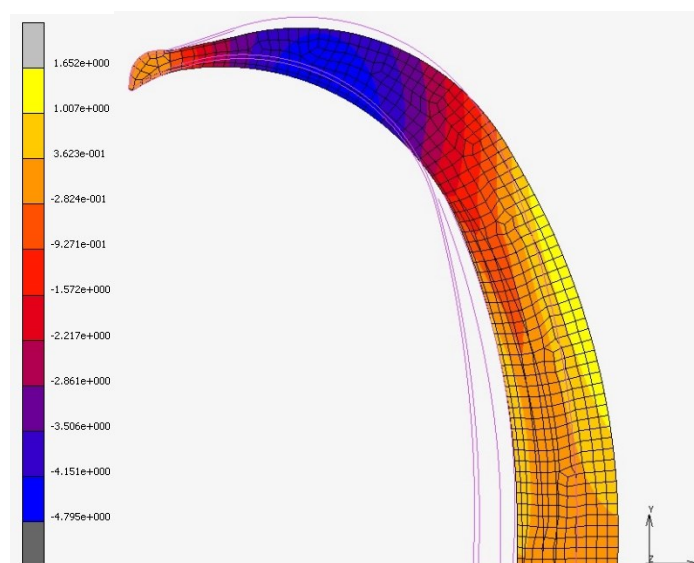
Po zatížení pneumatiky tlakem dojde k největšímu posunu v x-ové ose ve středu pneumatiky (nejvyšší hodnota posunutí dosahuje 16,76 mm).



Obr. 60 Posunutí v ose x

Posunutí v ose y

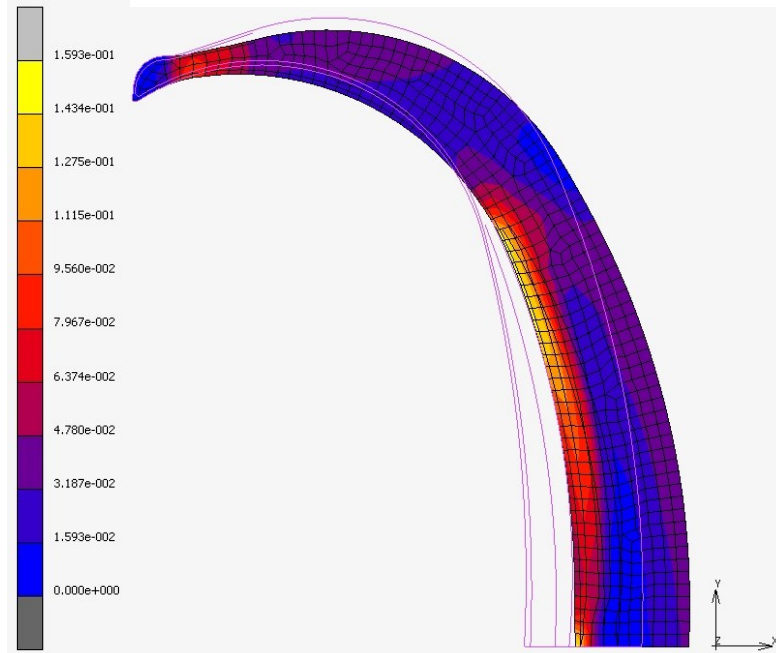
Po zatížení pneumatiky tlakem dojde k největšímu posunu v y-nové ose na běhounové části (nejvyšší hodnota posunutí dosahuje 1,652 mm).



Obr. 61 Posunutí v ose y

Poměrné prodloužení

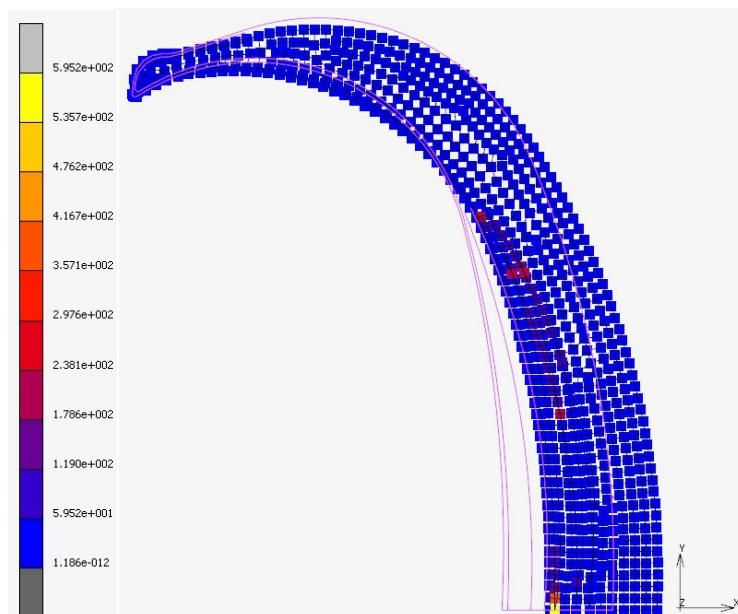
Po zatížení pneumatiky tlakem dojde k největšímu poměrnému prodloužení v místě uvnitř pneumatiky (nejvyšší hodnota poměrného prodloužení dosahuje 16 %).



Obr. 62 Poměrné prodloužení

Von Misesovo napětí

Po zatížení pneumatiky tlakem dojde k největšímu nárůstu napětí v místě, kde končí kordy (nejvyšší hodnota napětí dosahuje 595 MPa).



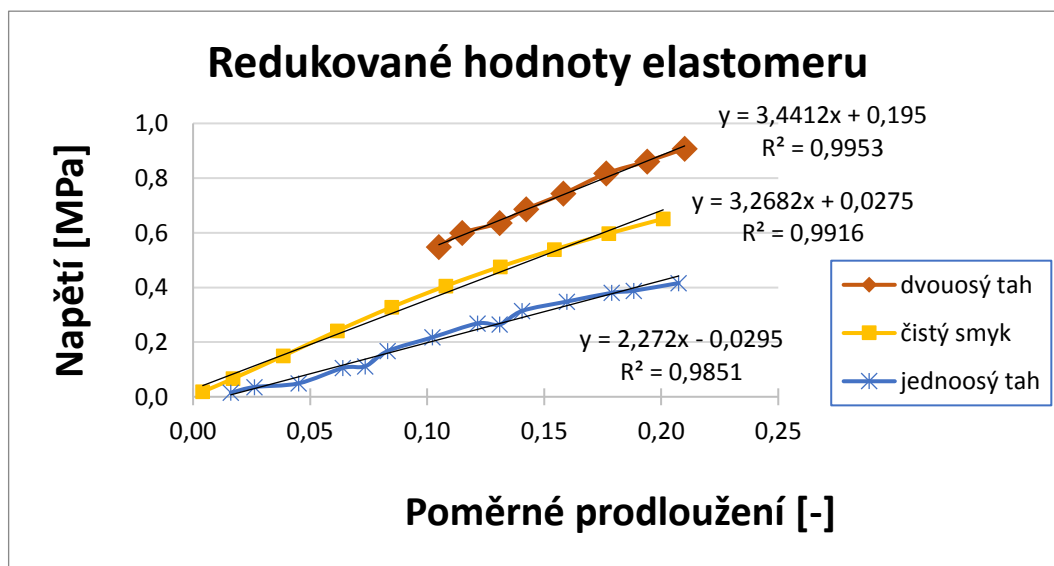
Obr. 63 Von Misesovo napětí

6 VÝSLEDKY

Vzhledem k tomu, že ve vzorovém příkladu maximální hodnota poměrného prodloužení byla 16 %. Bylo rozhodnuto, že naměřená data se zredukuje na maximální hodnotu poměrného prodloužení 20 %, za účelem přesnějšího výpočtu materiálových parametrů v dané oblasti. Výsledná materiálová data elastomeru tedy budou mít následující hodnoty:

Tabulka 2 Redukované hodnoty pro elastomer

Dvouosý tah		Čistý smyk		Jednoosý tah	
Poměrné prodloužení [-]	Napětí [MPa]	Poměrné prodloužení [-]	Napětí [MPa]	Poměrné prodloužení [-]	Napětí [MPa]
0,0000	0,0000000000	0,004133217	0,018554973	0,016120	0,015000
0,0950	0,5341463415	0,017164173	0,066560576	0,026280	0,035718
0,1050	0,5484573171	0,038516869	0,149554528	0,045080	0,049212
0,1150	0,5996524390	0,061701915	0,241646175	0,064080	0,105568
0,1310	0,6358978537	0,084894263	0,328128164	0,073640	0,111918
0,1424	0,6866102634	0,108076697	0,405764212	0,083200	0,167479
0,1583	0,7435720976	0,131268522	0,475848777	0,102320	0,217485
0,1766	0,8169621659	0,154455651	0,539173031	0,121520	0,268285
0,1940	0,8612525854	0,177645911	0,597391077	0,131040	0,264316
0,2100	0,9081492683	0,200838773	0,650934396	0,140640	0,314322
				0,159760	0,348453
				0,178840	0,380202
				0,188360	0,388140
				0,207440	0,415921



Obr. 64 Graf redukováných hodnoty elastomeru

6.1 Vliv tuhosti elastomeru

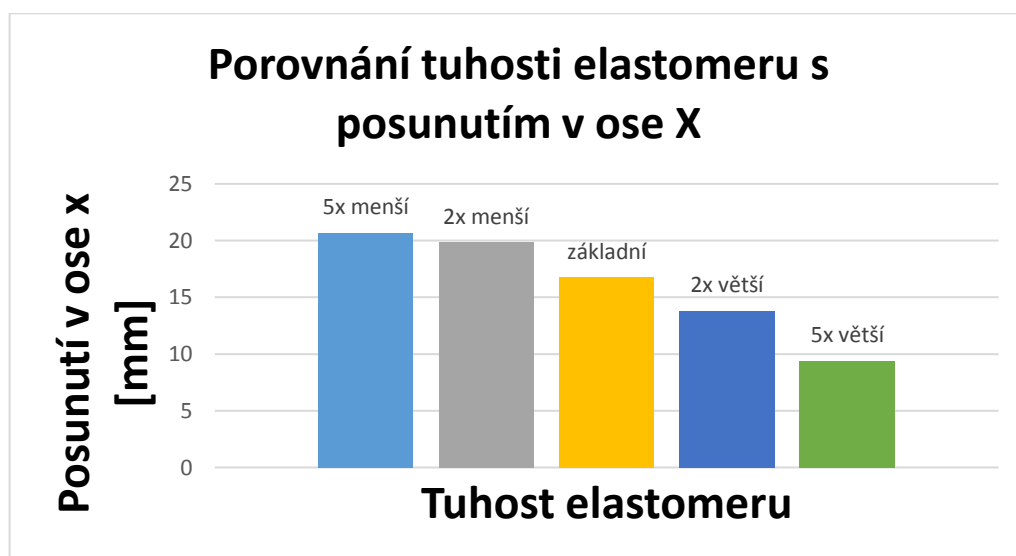
Bylo zjištěno, zda má deformace pneumatiky souvislost s materiálovou tuhostí elastomeru.

Z toho důvodu byl základní materiál upraven a byly navrženy zvětšené hodnoty napětí, přičemž hodnoty poměrné deformace zůstaly nezměněny. Napětí základního materiálu bylo postupně upraveno v následujícím pořadí: 5x menší, 2x menší, 2x větší a 5x větší.

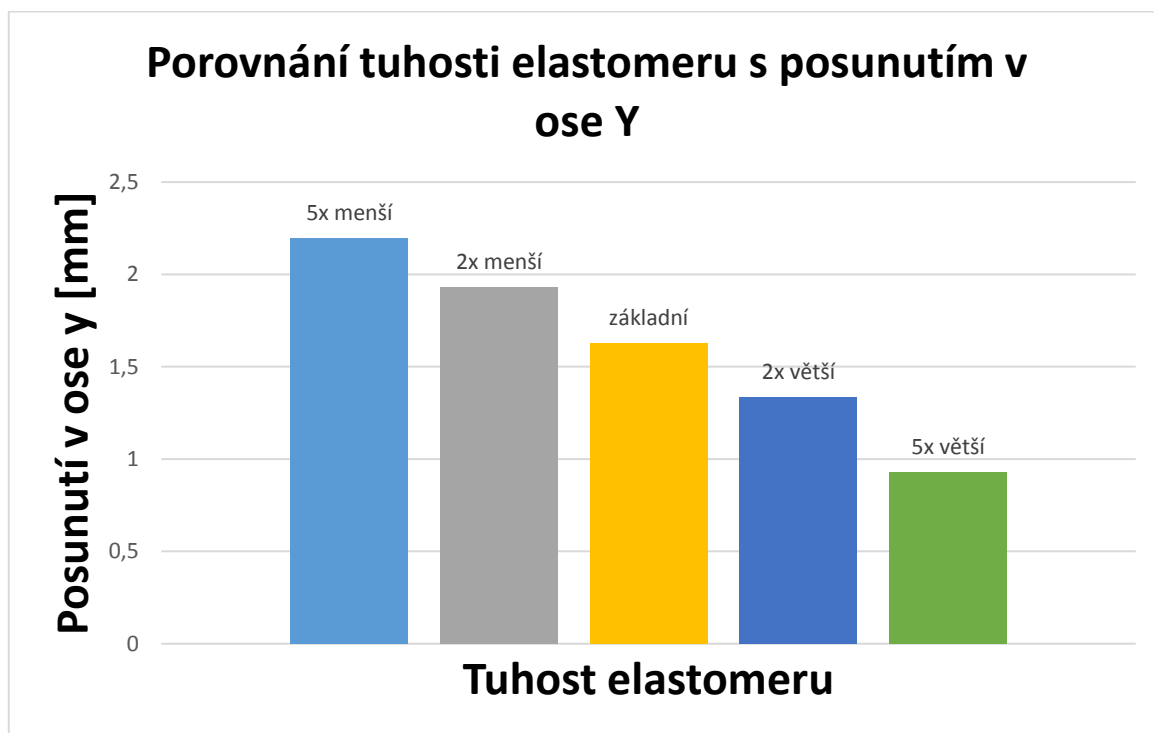
Tabulka 3 Vliv tuhosti elastomeru na vybrané parametry

Tuhost elastomeru	Poměrné prodloužení [-]	Von Misesovo napětí [MPa]	Posunutí v ose X [mm]	Posunutí v ose Y [mm]	Objemový modul pružnosti K [MPa]	koeficient c_{10} [-]	koeficient c_{01} [-]	Chyba materiálových koeficientů [%]
5x menší	0,26	954	20,72	2,196	697	-0,0235157	0,0933079	4,17
2x menší	0,21	781	18,84	1,929	1744	-0,0587889	0,2332690	4,17
základní	0,16	595	16,76	1,625	3489	-0,1175790	0,4665390	4,17
2x větší	0,11	386	13,84	1,336	6979	-0,2351570	0,9330790	4,17
5x větší	0,05	209	9,42	0,928	17448	-0,5878930	2,332700	4,17

Z provedeného měření bylo zjištěno, že s vlivem tuhosti elastomeru se ve velké míře redukuje vlastnosti výsledné pneumatiky. S klesající tuhostí elastomerního materiálu se rozměry pneumatiky (zejména posunutí v ose x) již příliš nemění, za což může souvislost s faktem, že danou změnou parametry ovlivňují zadané výztuže v pneumatice.

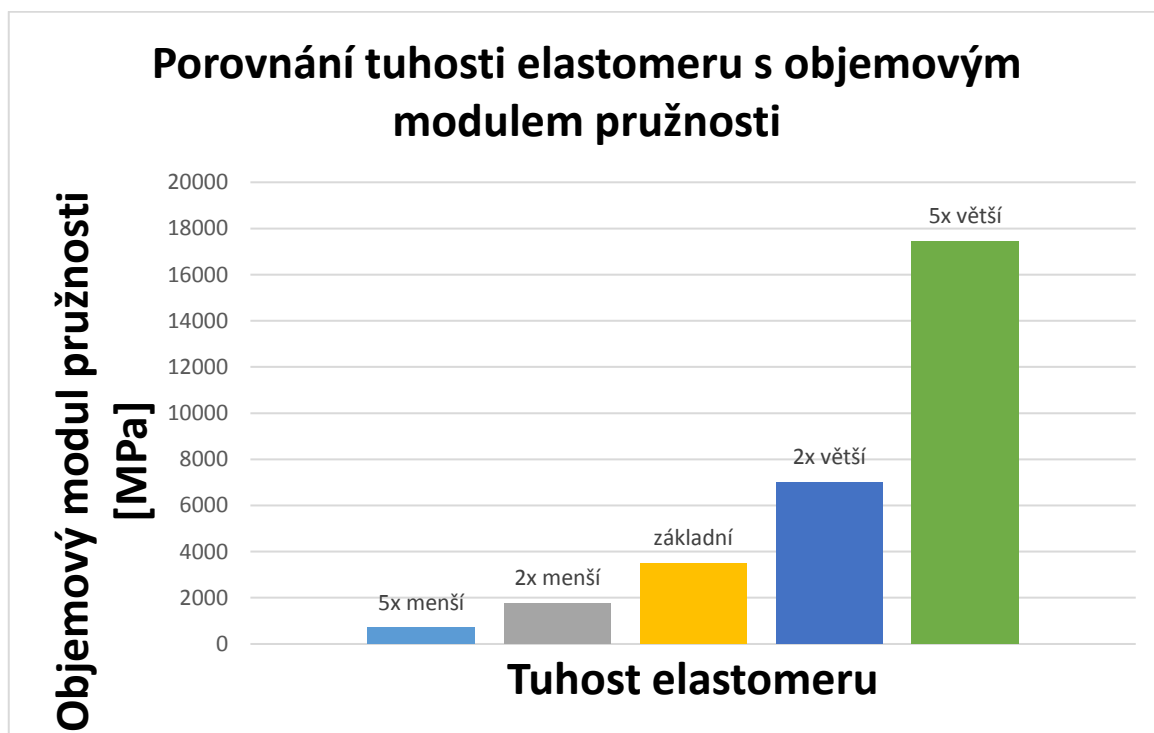


Obr. 65 Závislost nastavených hodnot napětí v materiálu na posunutí v ose x



Obr. 66 Závislost nastavených hodnot napětí v materiálu na posunutí v ose y

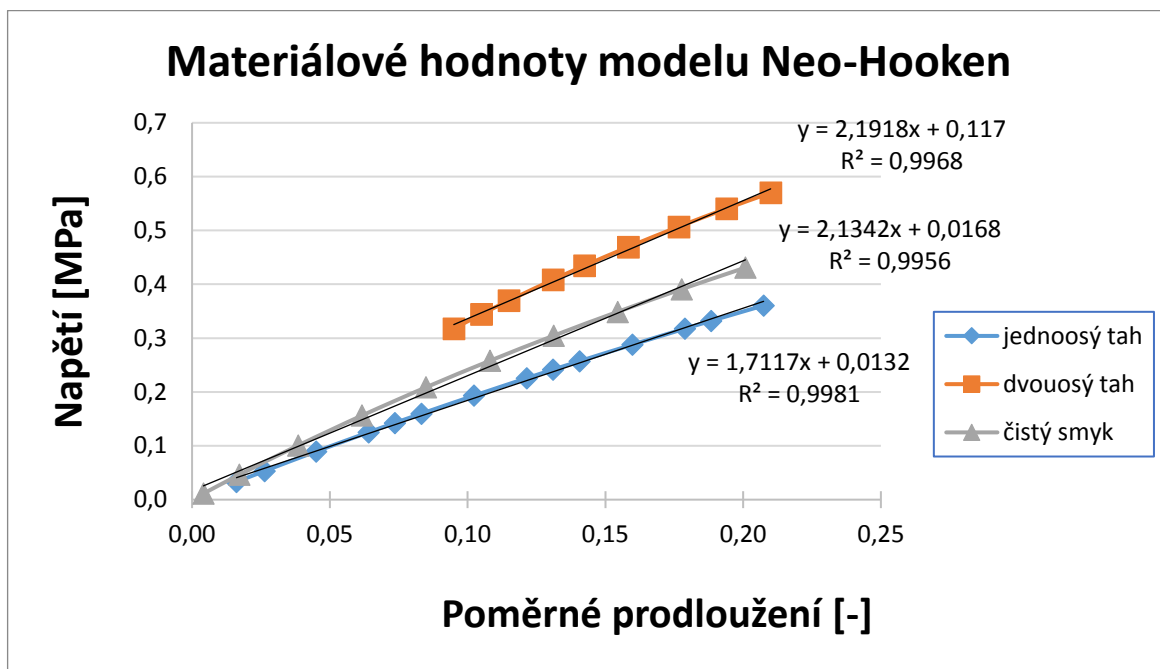
Porovnáním změny tuhosti materiálu elastomeru s objemovým modulem pružnosti je zřejmé, že se objemovým modul pružnosti mění přímo úměrně se vzrůstající tuhostí.



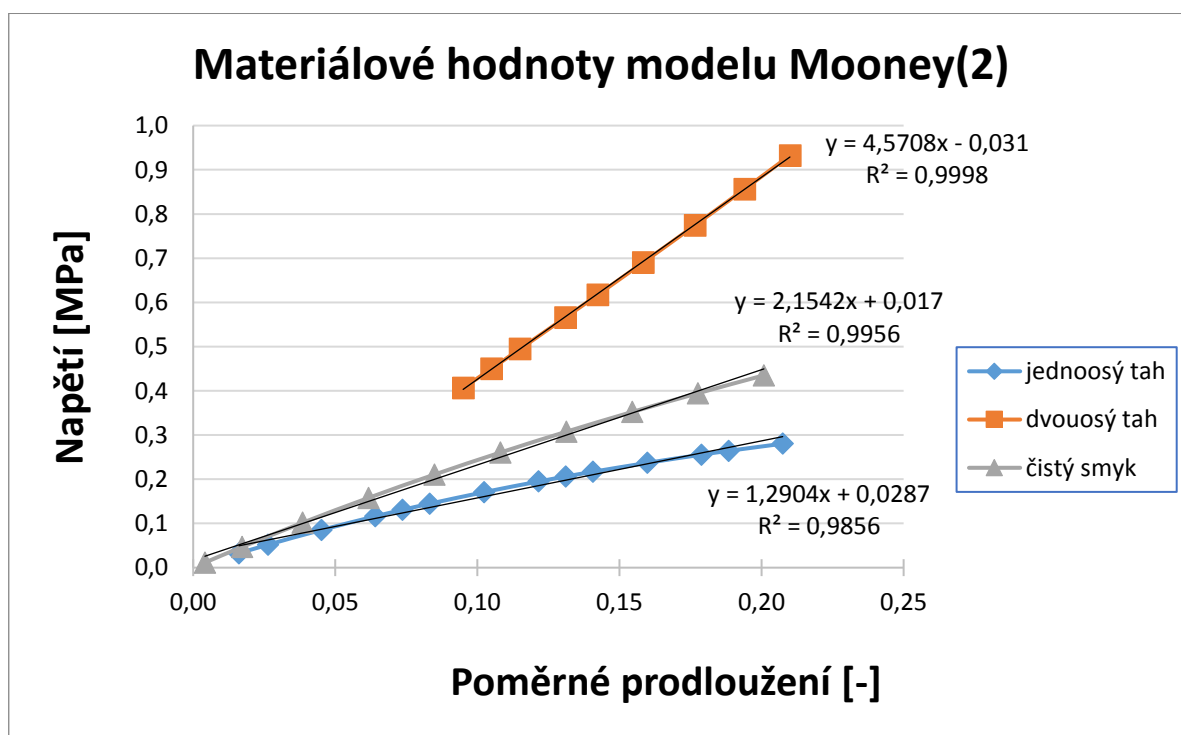
Obr. 67 Závislost nastavených hodnot napětí v materiálu na objemovém modulu pružnosti

6.2 Materiálové hodnoty vybraných modelů

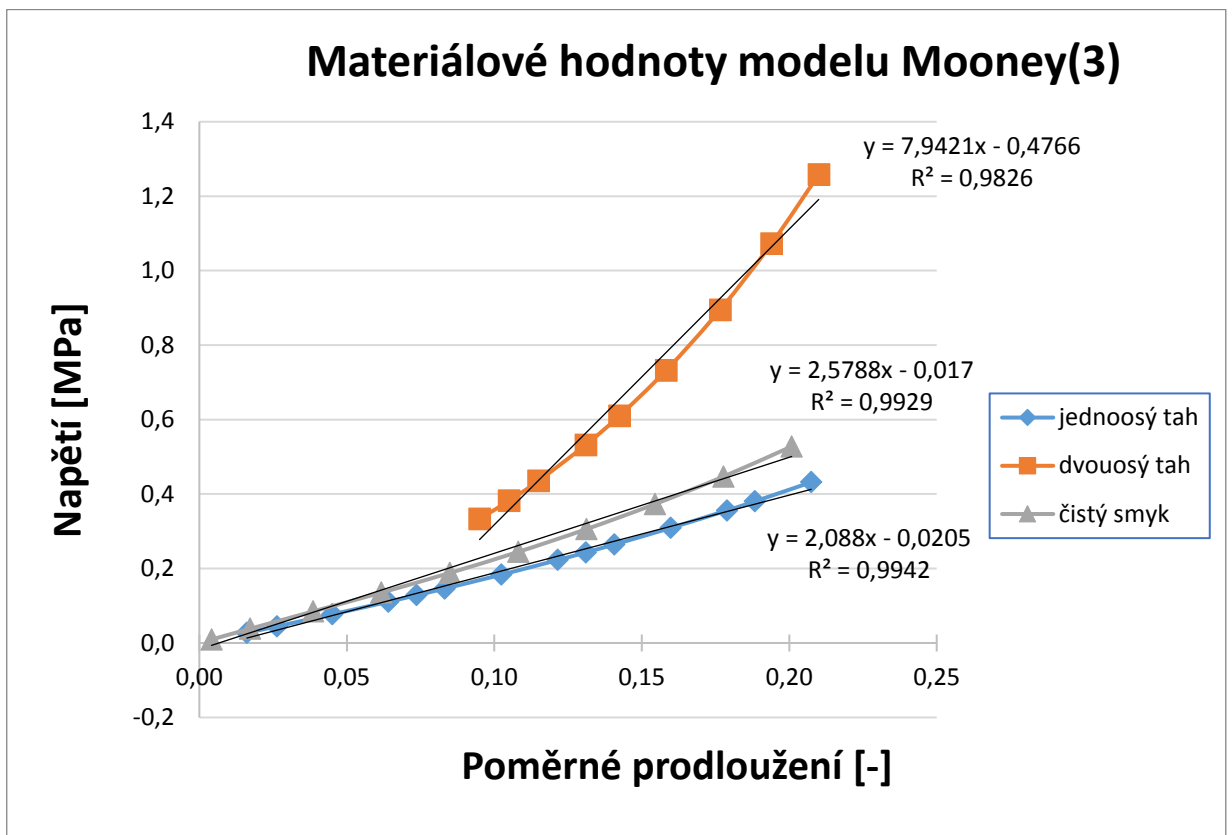
Na grafech níže jsou uvedeny napěťové křivky vzhledem k poměrnému prodloužení jednotlivých modelů vyhodnocené v programu Marc mentat 2015. Rozdíly daných křivek jsou patrné na první pohled, zejména u dvouosého tahu. Níže následuje i celkové srovnání modelů.



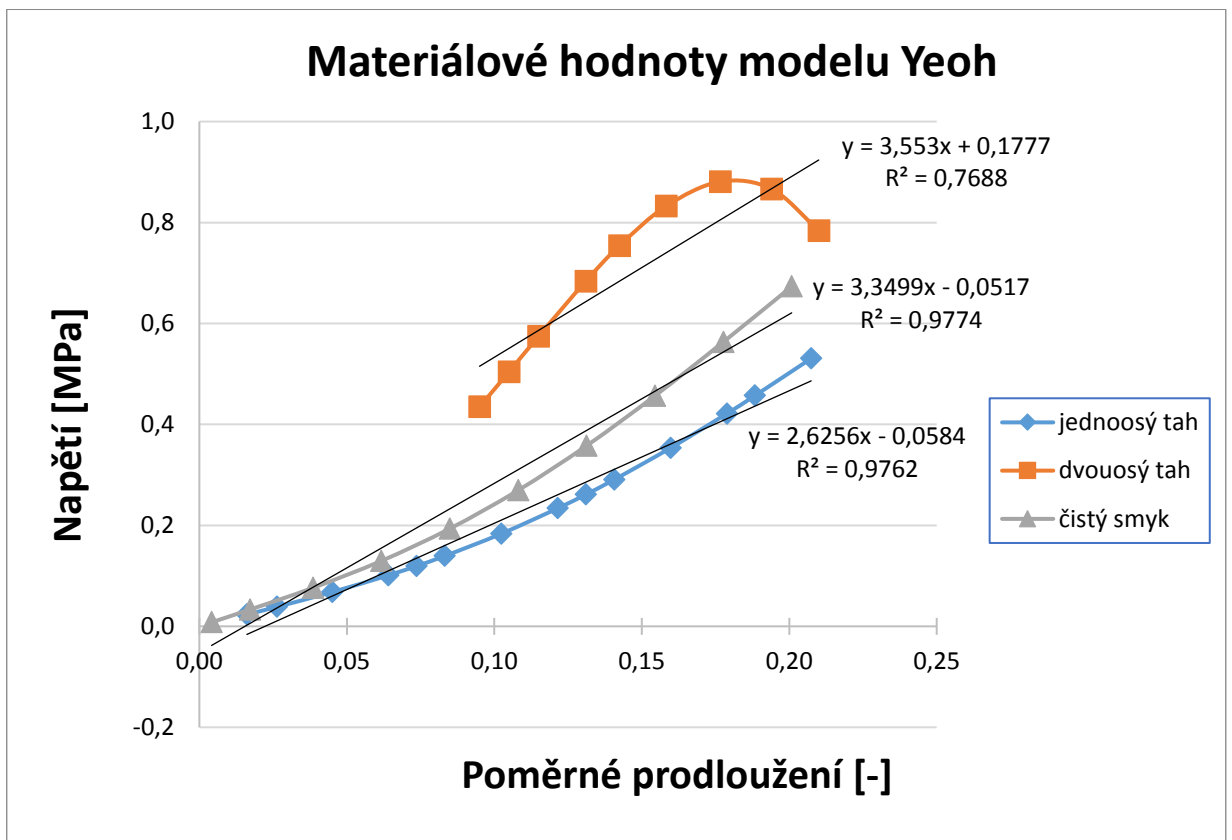
Obr. 68 Graf materiálových hodnot modelu Neo-Hokken



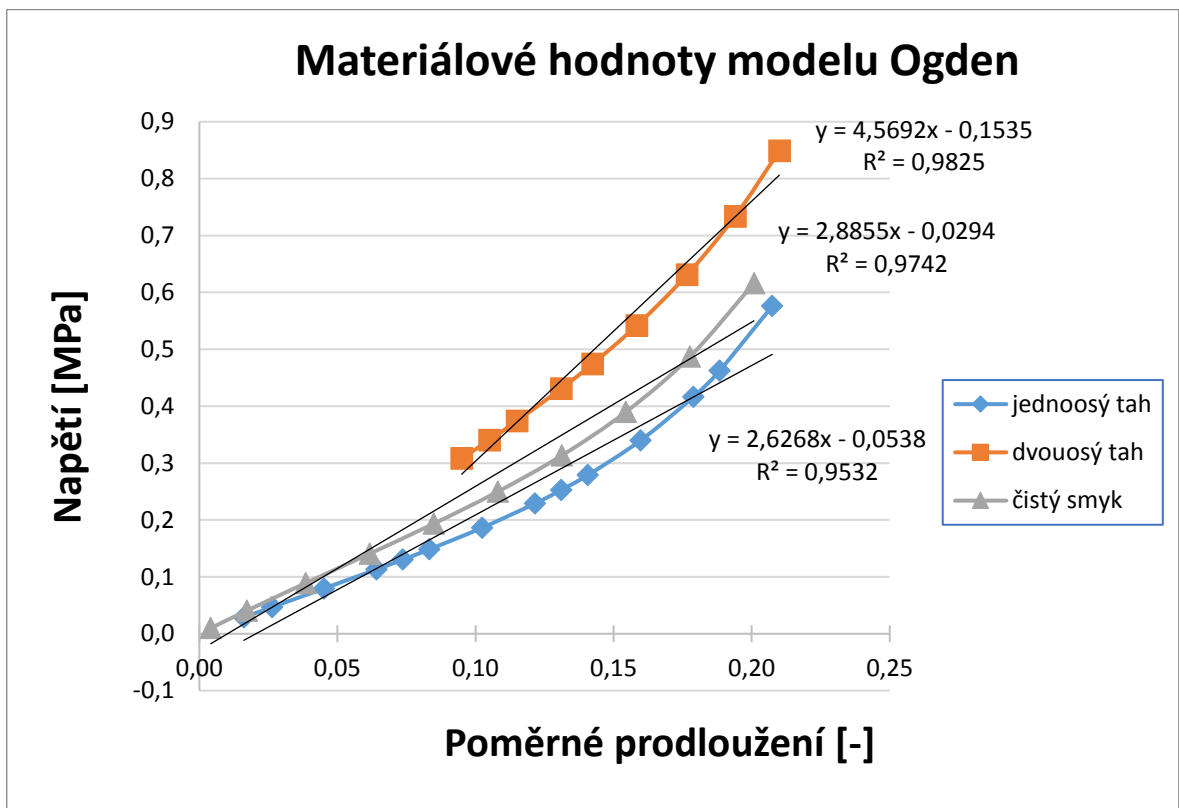
Obr. 69 Graf materiálových hodnot modelu Mooney(2)



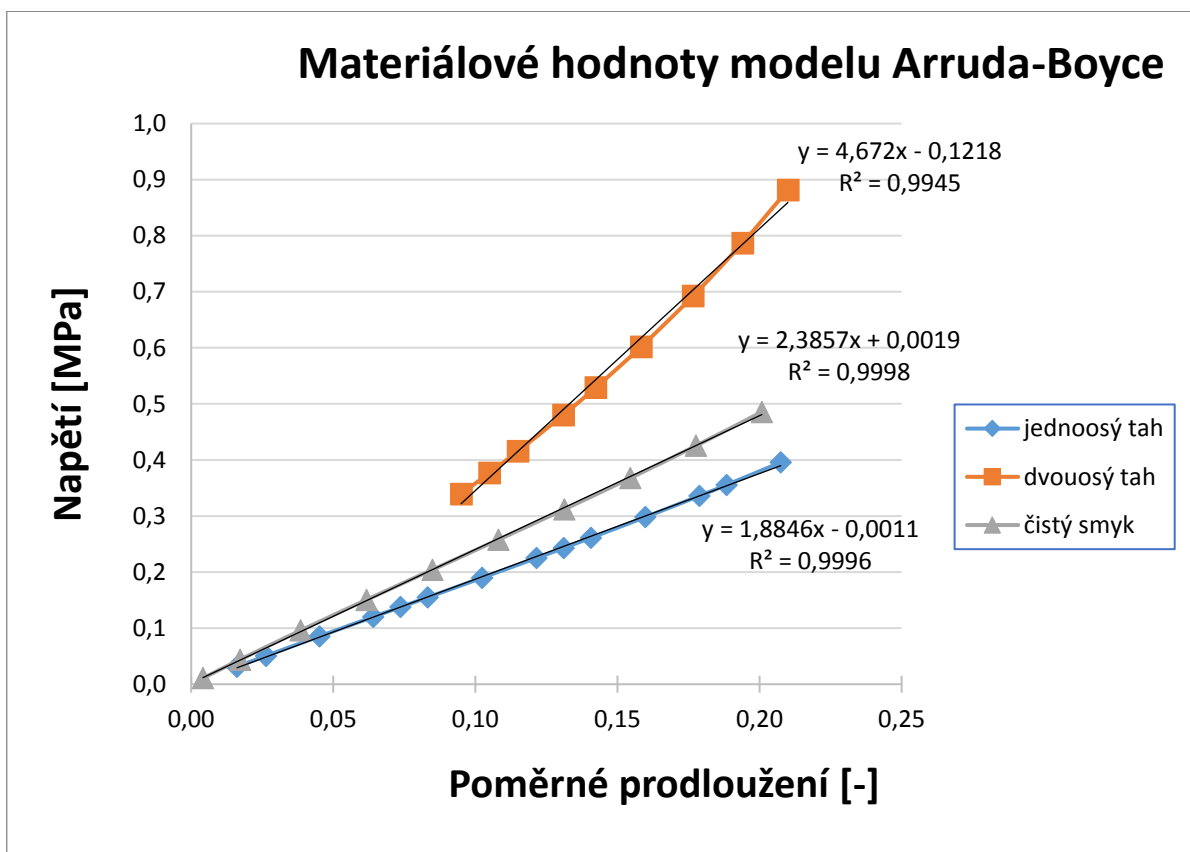
Obr. 70 Graf materiálových hodnot modelu Mooney(3)



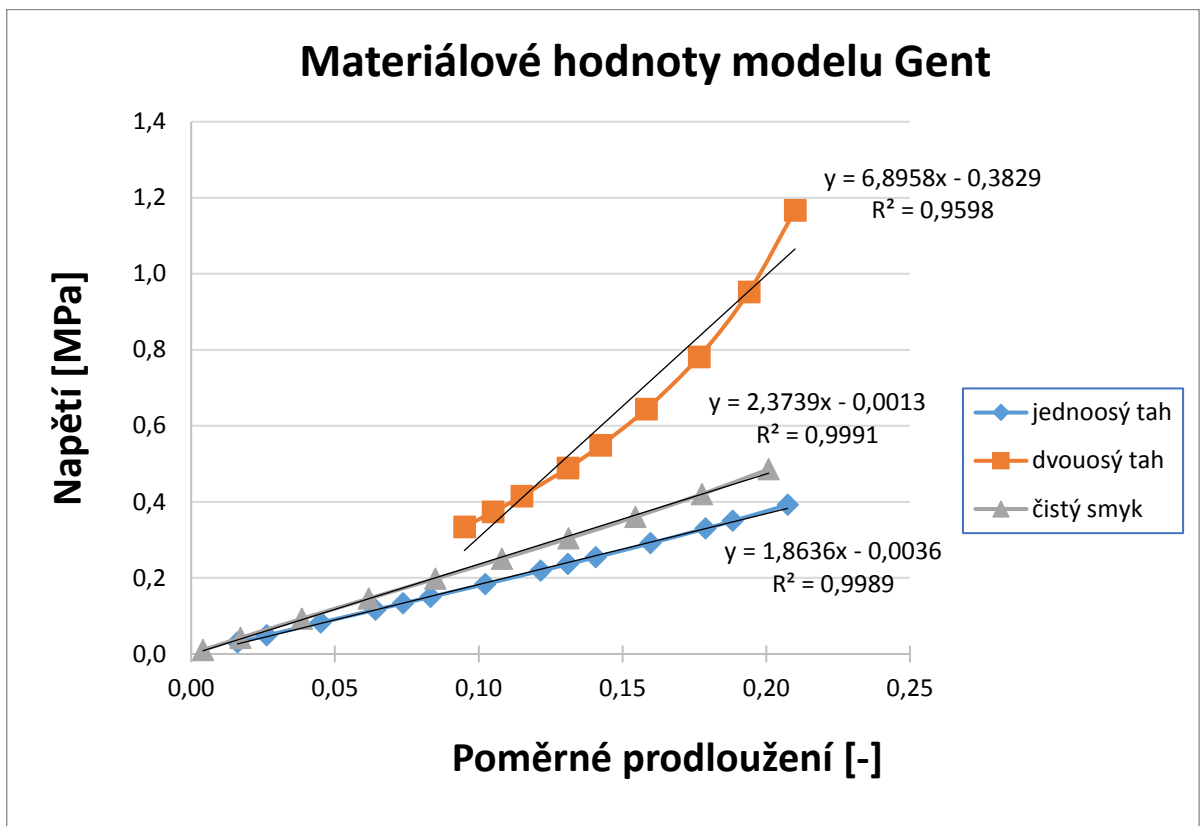
Obr. 71 Graf materiálových hodnot modelu Yeoh



Obr. 72 Graf materiálových hodnot modelu Ogden



Obr. 73 Graf materiálových hodnot modelu Arruda-Boyce

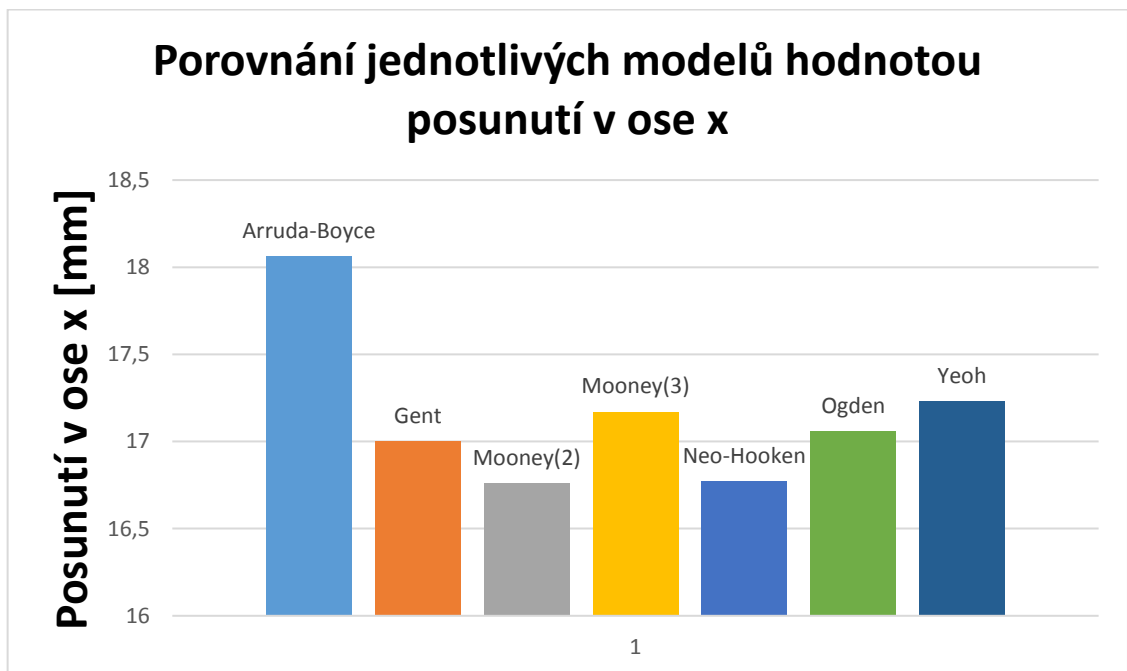


Obr. 74 Graf materiálových hodnot modelu Gent

Následovalo otestování jednotlivých modelů na uvedeném případě.

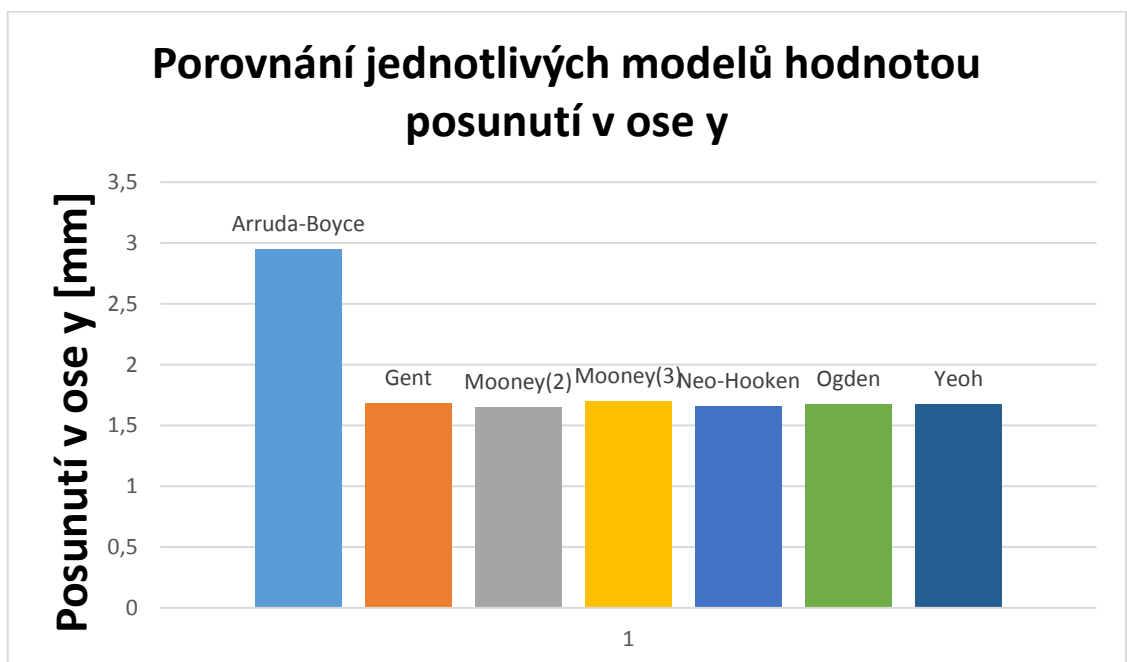
Tabulka 4 Vypočítané hodnoty hyperelastických materiálových modelů

Model	Po- měrné prodlou- žení [-]	Von Mi- sesovo na- pětí [MPa]	Posunutí v ose X [mm]	Posunutí v ose Y [mm]	Objemový mo- dul pružnosti [MPa]	Chyba materiálo- vých koeficientů [%]
Arruda-Boyce	0,17	641	18,06	2,95	-	3,17
Gent	0,16	610	17,00	1,68	3155	3,68
Mooney(2)	0,16	595	16,76	1,65	3489	4,17
Mooney(3)	0,16	618	17,17	1,70	2845	3,25
Neo-Hookeen	0,16	601	16,77	1,66	3457	5,11
Ogden	0,16	610	17,06	1,67	3021	3,69
Yeoh	0,15	600	17,23	1,67	2447	2,17



Obr. 75 Porovnání jednotlivých modelů hodnotou posunutí v ose x

Porovnáním jednotlivých hyperelastických modelů hodnotou posunutí v ose x je zřejmé, že jednotlivé modely mají rozdílné výsledky. Maximální rozdíl mezi hodnotami je 0,5 mm (pokud neuvažujeme model Arruda-Boyce). Model Arruda-Boyce se podobnosti ostatních modelů vymyká. Tato rozdílná hodnota je dána tím, že model Arruda-Boyce provádí výpočet na základě vnitřní struktury elastomerů. Daný rozdíl modelu Arruda-Boyce je nejlépe k vidění na grafu níže, kdy je hodnota posunutí v ose y větší zhruba o 70 %.

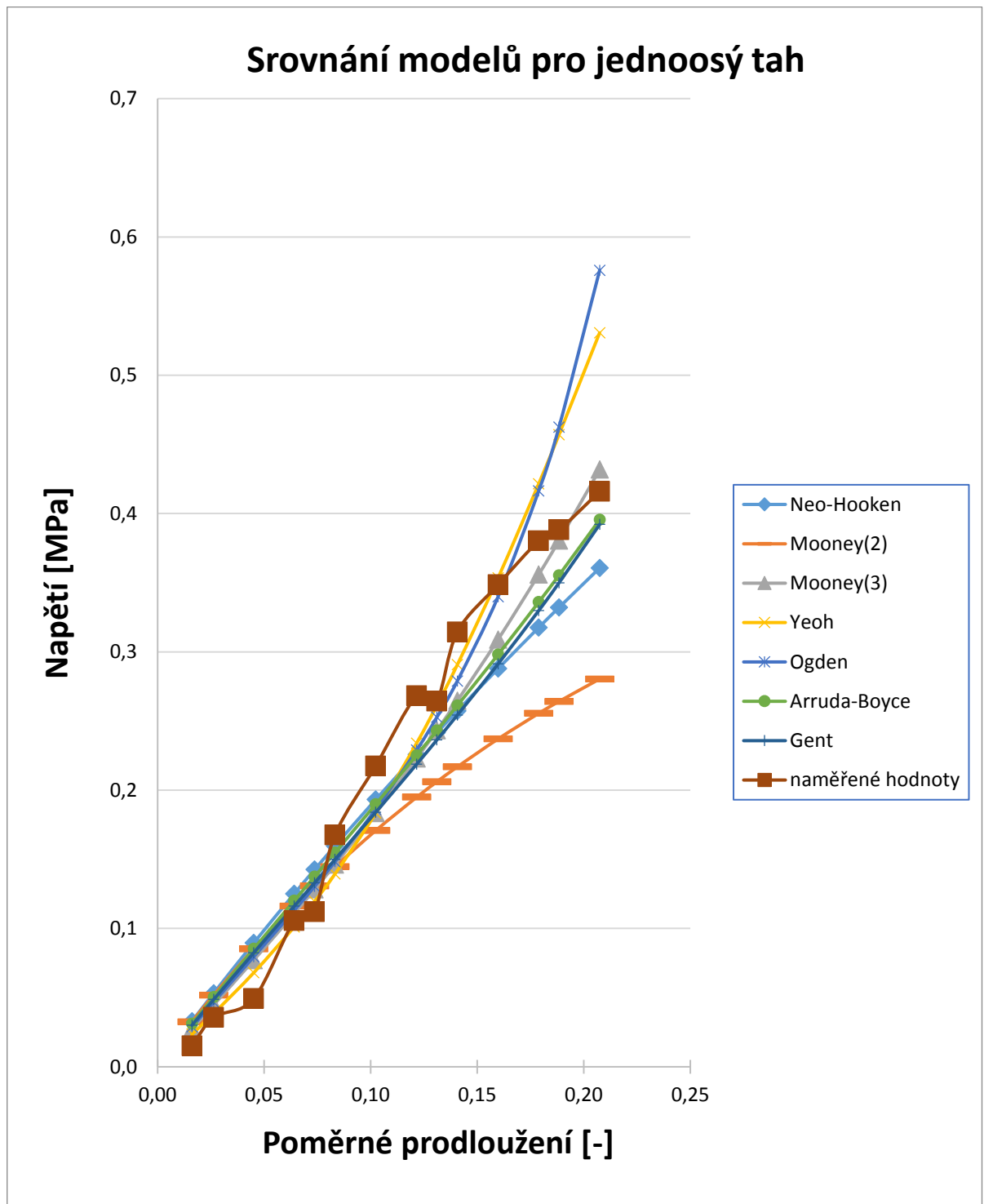


Obr. 76 Porovnání jednotlivých modelů hodnotou posunutí v ose y

7 VYHODNOCENÍ

7.1 Srovnání hyperelastických modelů

7.1.1 Srovnání hyperelastických modelů pro jednoosý tah



Obr. 77 Graf Srovnání jednotlivých modelů pro jednoosý tah

Pro srovnání jednotlivých modelů vzhledem k naměřeným datům bylo využito lineární regrese. Níže výpis lineárních regresních rovnic z modelů.

Tabulka 5 Rovnice lineární regrese modelů pro jednoosý tah

Model	Rovnice lineární regrese	Hodnota spolehlivosti
Arruda-Boyce	$y = 1,8846x - 0,0011$	0,9996
Gent	$y = 1,8636x - 0,0036$	0,9989
Mooney(2)	$y = 1,2904x + 0,0287$	0,9856
Mooney(3)	$y = 2,0880x - 0,0205$	0,9942
Neo-Hooken	$y = 1,7117x + 0,0132$	0,9981
Ogden	$y = 2,6268x - 0,0538$	0,9532
Yeoh	$y = 2,6256x - 0,0584$	0,9762
Naměřená data	$y = 2,272x - 0,0295$	0,9851

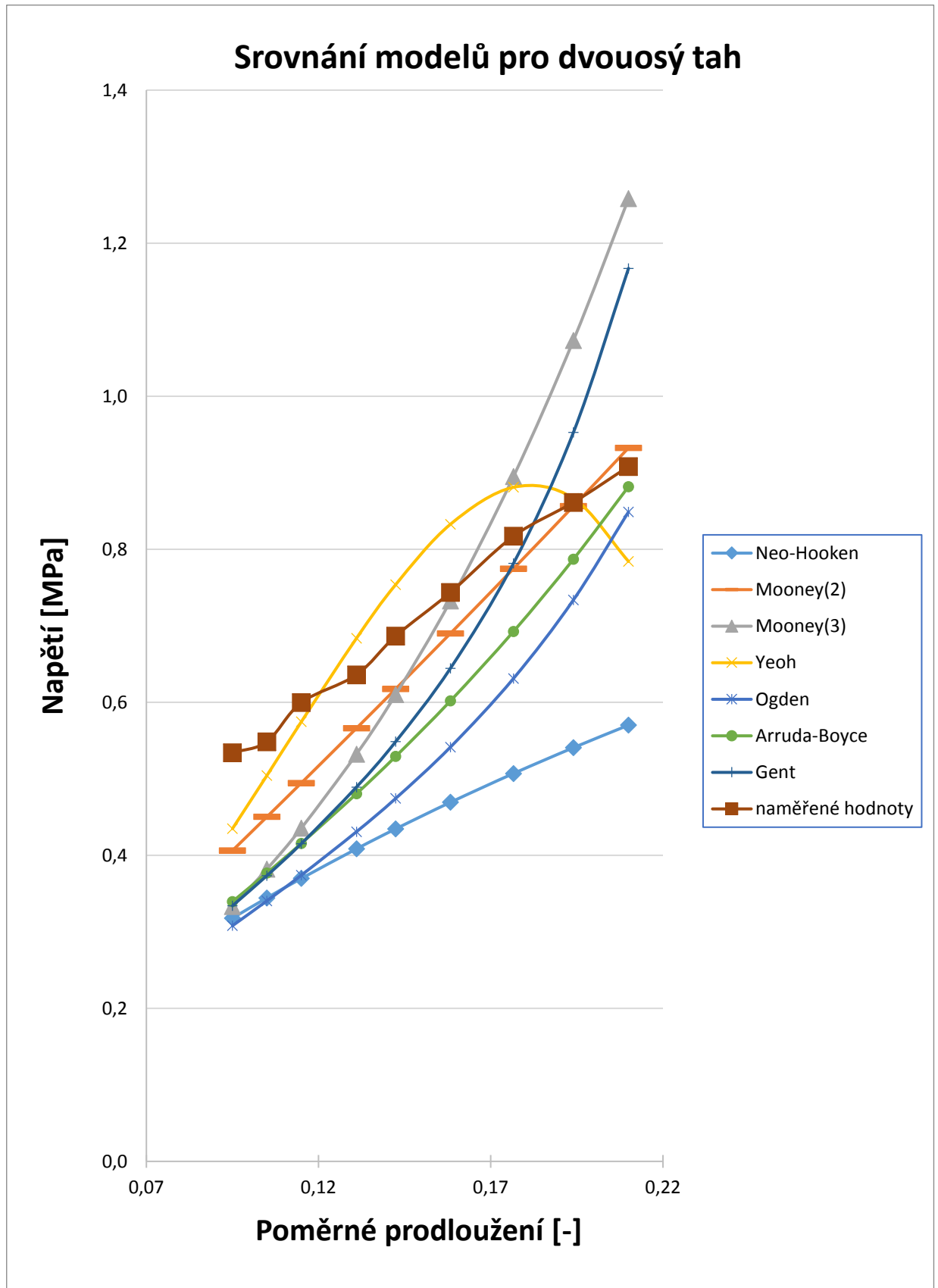
Následně byly dané rovnice vyhodnoceny vzhledem k rovnici naměřených dat a byly seřazeny dle nejlépe odpovídajícího průběhu.

Tabulka 6 Seřazení jednotlivých modelů dle vhodnosti pro jednoosý tah

Model	Rovnice lineární regrese	Hodnota spolehlivosti
Naměřená data	$y = 2,272x - 0,0295$	0,9851
Mooney(3)	$y = 2,0880x - 0,0205$	0,9942
Yeoh	$y = 2,6256x - 0,0584$	0,9762
Ogden	$y = 2,6268x - 0,0538$	0,9532
Arruda-Boyce	$y = 1,8846x - 0,0011$	0,9996
Gent	$y = 1,8636x - 0,0036$	0,9989
Neo-Hooken	$y = 1,7117x + 0,0132$	0,9981
Mooney(2)	$y = 1,2904x + 0,0287$	0,9856

Za nejvhodnější hyperelastické modely pro jednoosý tah byly tedy zvoleny: Mooney(3), Yeoh a Ogden.

7.1.2 Srovnání hyperelastických modelů pro dvouosý tah



Obr. 78 Graf Srovnání jednotlivých modelů pro dvouosý tah

Pro srovnání jednotlivých modelů vzhledem k naměřeným datům bylo využito lineární regrese. Níže výpis lineárních regresních rovnic z modelů.

Tabulka 7 Rovnice lineární regrese modelů pro dvouosý tah

Model	Rovnice lineární regrese	Hodnota spolehlivosti
Arruda-Boyce	$y = 4,672x - 0,1218$	0,9945
Gent	$y = 6,8958x - 0,3829$	0,9598
Mooney(2)	$y = 4,5708x - 0,031$	0,9998
Mooney(3)	$y = 7,9421x - 0,4766$	0,9826
Neo-Hookeen	$y = 2,1918x + 0,117$	0,9968
Ogden	$y = 4,5692x - 0,1535$	0,9825
Yeoh	$y = 3,553x + 0,1777$	0,7688
Naměřená data	$y = 3,4412x + 0,195$	0,9953

Následně byly dané rovnice vyhodnoceny vzhledem k rovnici naměřených dat a byly seřazeny dle nejlépe odpovídajícího průběhu.

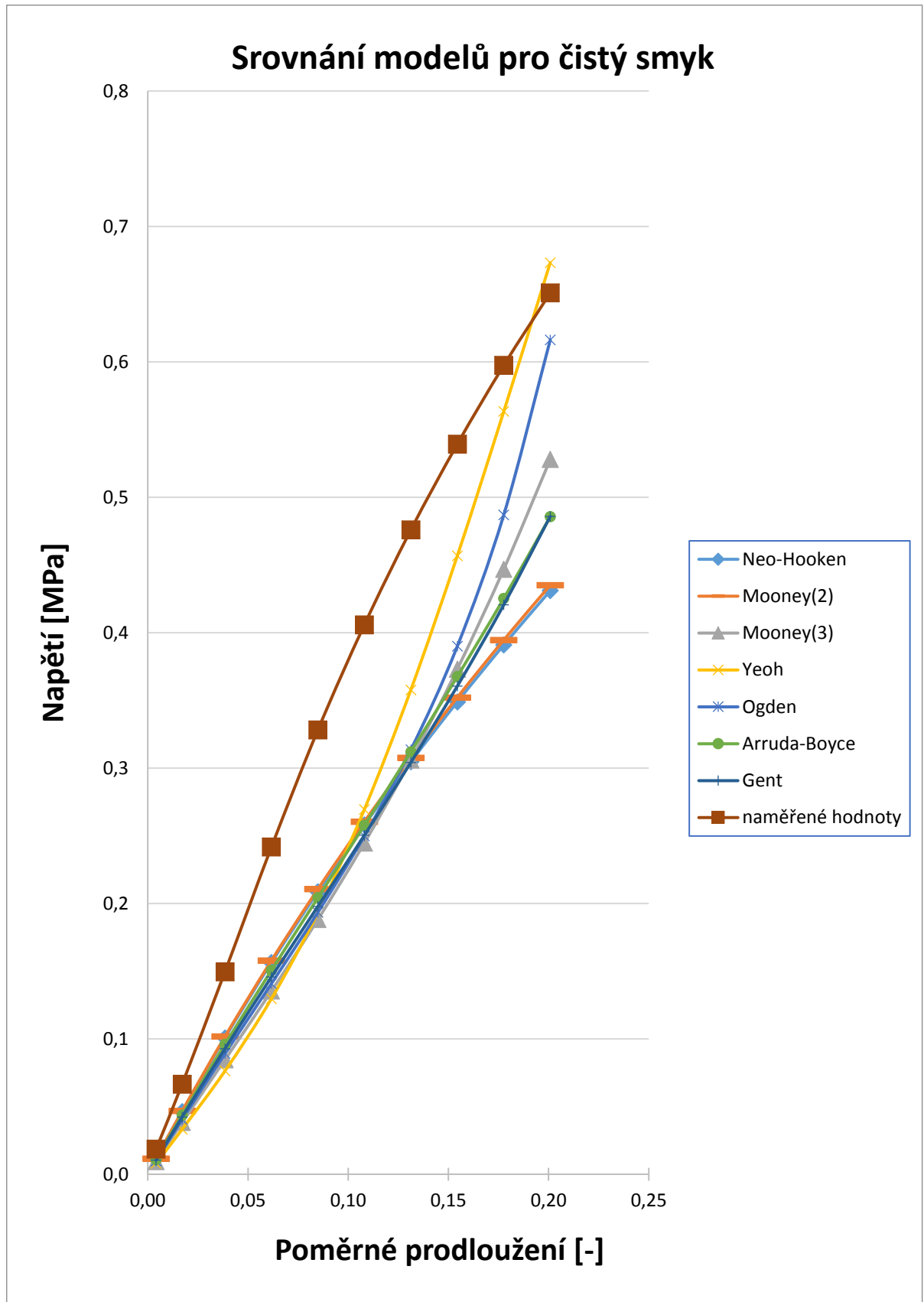
Tabulka 8 Seřazení jednotlivých modelů dle vhodnosti pro dvouosý tah

Model	Rovnice lineární regrese	Hodnota spolehlivosti
Naměřená data	$y = 3,4412x + 0,195$	0,9953
Yeoh	$y = 3,553x + 0,1777$	0,7688
Ogden	$y = 4,5692x - 0,1535$	0,9825
Mooney(2)	$y = 4,5708x - 0,031$	0,9998
Arruda-Boyce	$y = 4,672x - 0,1218$	0,9945
Neo-Hookeen	$y = 2,1918x + 0,117$	0,9968
Gent	$y = 6,8958x - 0,3829$	0,9598
Mooney(3)	$y = 7,9421x - 0,4766$	0,9826

Ačkoli model Yeoh je dle srovnání lineární regrese velmi blízký naměřeným datům, nelze jej doporučit jako nejvhodnější model z důvodu velmi malé spolehlivosti rovnice lineární regrese.

Za nejvhodnější hyperelastické modely pro dvouosý tah byly tedy zvoleny: Ogden, Mooney(2), Arruda-Boyce.

7.1.3 Srovnání hyperelastických modelů pro čistý smyk



Obr. 79 Graf Srovnání jednotlivých modelů pro čistý smyk

Pro srovnání jednotlivých modelů vzhledem k naměřeným datům bylo využito lineární regrese. Níže výpis lineárních regresních rovnic z modelů.

Tabulka 9 Rovnice lineární regrese modelů pro čistý smyk

Model	Rovnice lineární regrese	Hodnota spolehlivosti
Arruda-Boyce	$y = 2,3857x + 0,0019$	0,9998
Gent	$y = 2,3739x - 0,0013$	0,9991
Mooney(2)	$y = 2,1542x + 0,017$	0,9956
Mooney(3)	$y = 2,5788x - 0,017$	0,9929
Neo-Hooken	$y = 2,1342x + 0,0168$	0,9956
Ogden	$y = 2,8855x - 0,0294$	0,9742
Yeoh	$y = 3,3499x - 0,0517$	0,9774
Naměřená data	$y = 3,2682x + 0,0275$	0,9916

Následně byly dané rovnice vyhodnoceny vzhledem k rovnici naměřených dat a byly seřazeny dle nejlépe odpovídajícího průběhu.

Tabulka 10 Seřazení jednotlivých modelů dle vhodnosti pro čistý smyk

Model	Rovnice lineární regrese	Hodnota spolehlivosti
Naměřená data	$y = 3,2682x + 0,0275$	0,9916
Yeoh	$y = 3,3499x - 0,0517$	0,9774
Ogden	$y = 2,8855x - 0,0294$	0,9742
Mooney(3)	$y = 2,5788x - 0,017$	0,9929
Arruda-Boyce	$y = 2,3857x + 0,0019$	0,9998
Gent	$y = 2,3739x - 0,0013$	0,9991
Mooney(2)	$y = 2,1542x + 0,017$	0,9956
Neo-Hooken	$y = 2,1342x + 0,0168$	0,9956

Za nejvhodnější hyperelastické modely pro čistý smyk byly tedy zvoleny: Yeoh, Ogden a Mooney(3).

7.1.4 Stanovení nejvhodnějšího hyperelastického modelu

Následuje rekapitulace výsledků.

Za nejvhodnější hyperelastické modely pro jednoosý tah byly zvoleny: Mooney(3), Yeoh a Ogden.

Za nejvhodnější hyperelastické modely pro dvouosý tah byly zvoleny: Ogden, Mooney(2), Arruda-Boyce.

Za nejvhodnější hyperelastické modely pro čistý smyk byly zvoleny: Yeoh, Ogden a Mooney(3).

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že za nejvhodnější hyperelastický model je model Ogden, jak již bylo popsáno v teoretické části. Daný model vyjadřuje funkci danou v hodnotách hlavních protažení a je dnes široce využíváný, navíc vystihuje chování elastomerů i při velkých deformacích.

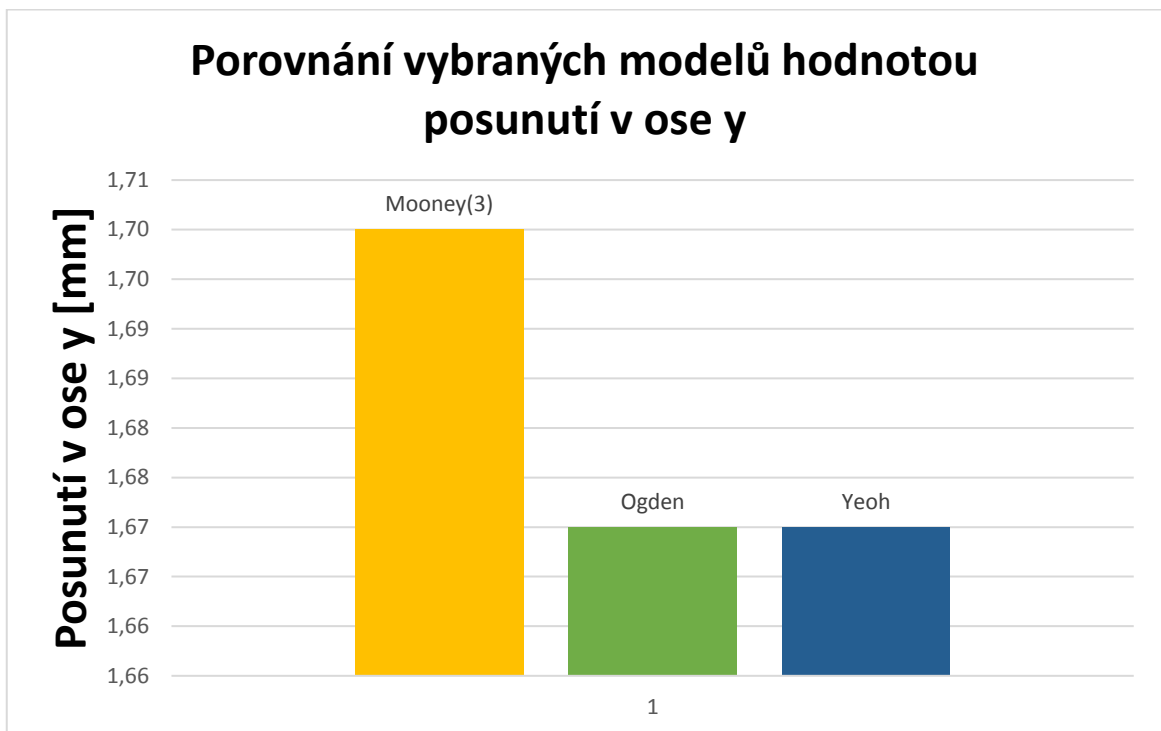
Za další velmi vhodný hyperelastický model byl zvolen model Yeoh, jehož výhodou je zejména velká jednoduchost.

Třetím nejvhodnějším modelem byl zvolen model Mooney(3). Ačkoli tento model patří ke spíše starším, rozhodně si zaslouží pozornost.

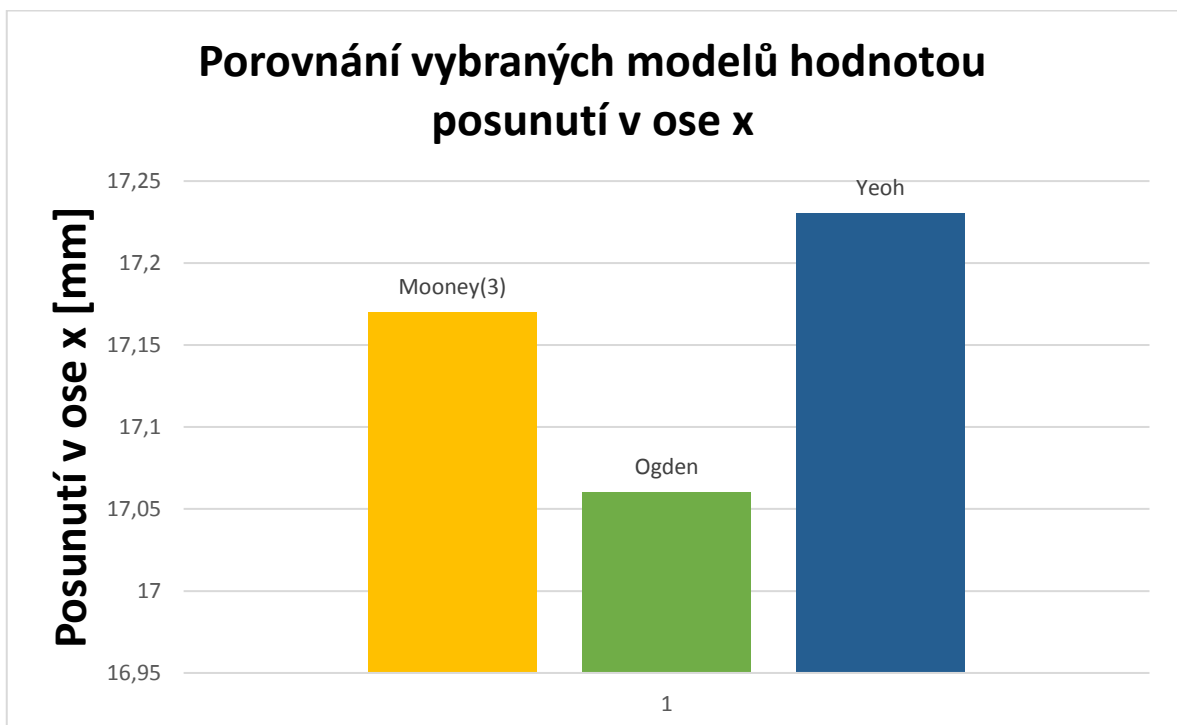
Nejvíce vhodným modelem pro danou pneumatiku je tedy model Ogden, model Yeoh a model Mooney(3). Níže je rekapitulace zjištěných výsledků výpočtu pneumatiky a srovnání jednotlivých modelů s naměřenými daty. Z veškerých hodnot na níže vyobrazených grafech jde vidět, že dané tři materiálové modely si jsou velmi blízké, z toho důvodu lze doporučit pro výpočet pneumatiky všechny tři.

Tabulka 11 Vybrané vypočítané hodnoty hyperelastických materiálových modelů

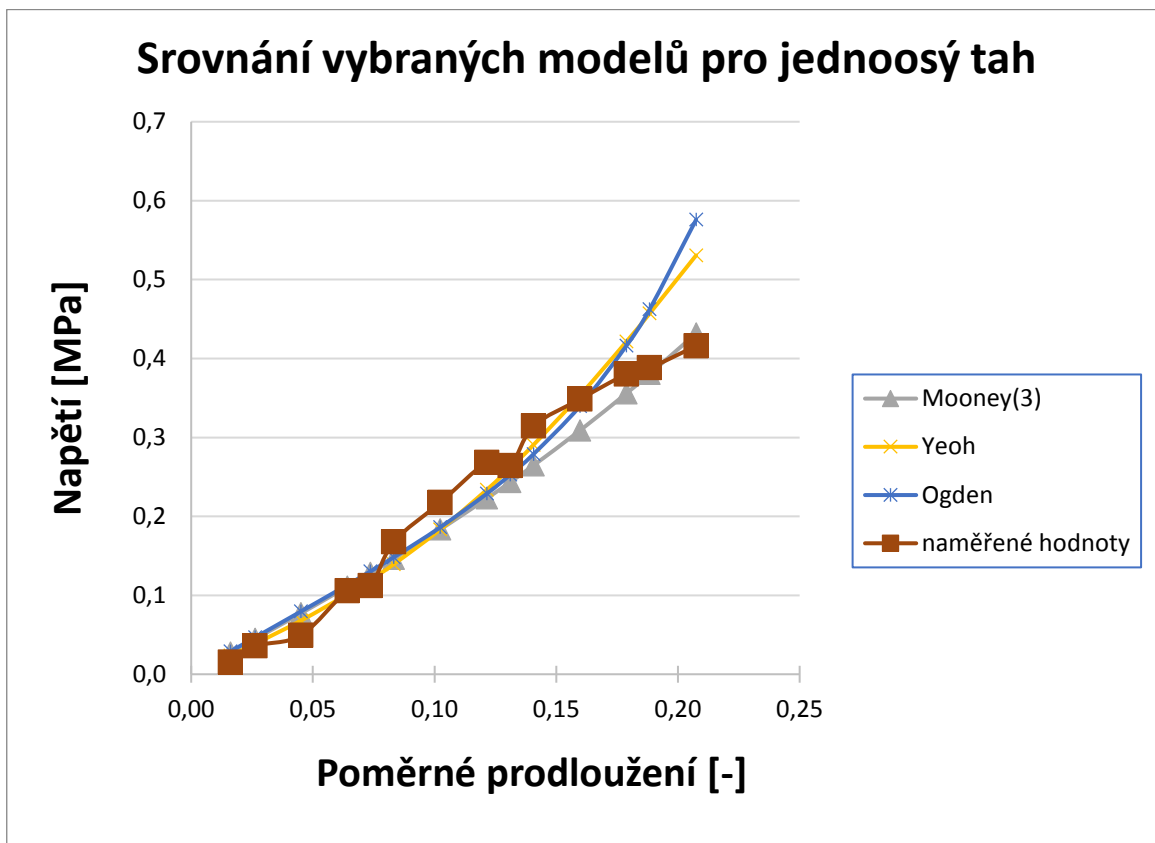
Model	Poměrné prodloužení [-]	Von Misesovo napětí [MPa]	Posunutí v ose X [mm]	Posunutí v ose Y [mm]	Objemový modul pružnosti [MPa]	Chyba materiálových koeficientů [%]
Ogden	0,16	610	17,06	1,67	3021	3,69
Yeoh	0,15	600	17,23	1,67	2447	2,17
Mooney(3)	0,16	618	17,17	1,70	2845	3,25



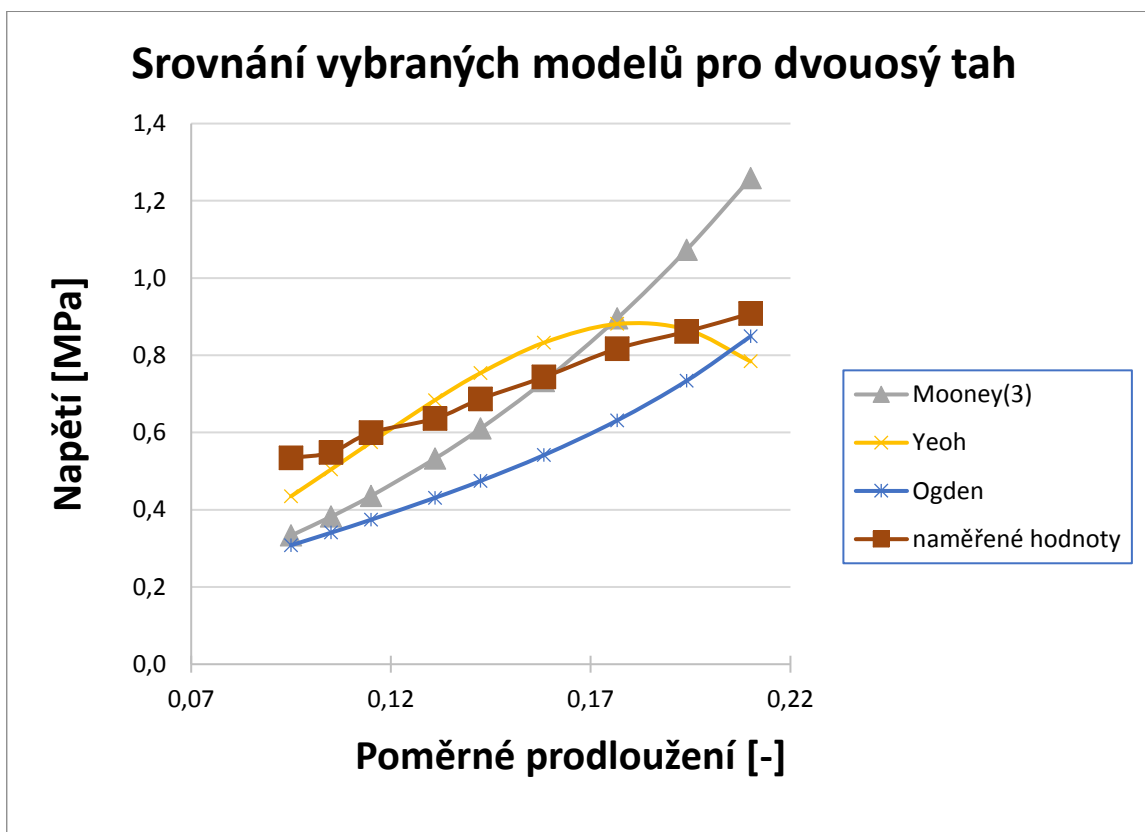
Obr. 80 Porovnání vybraných modelů hodnotou posunutí v ose x



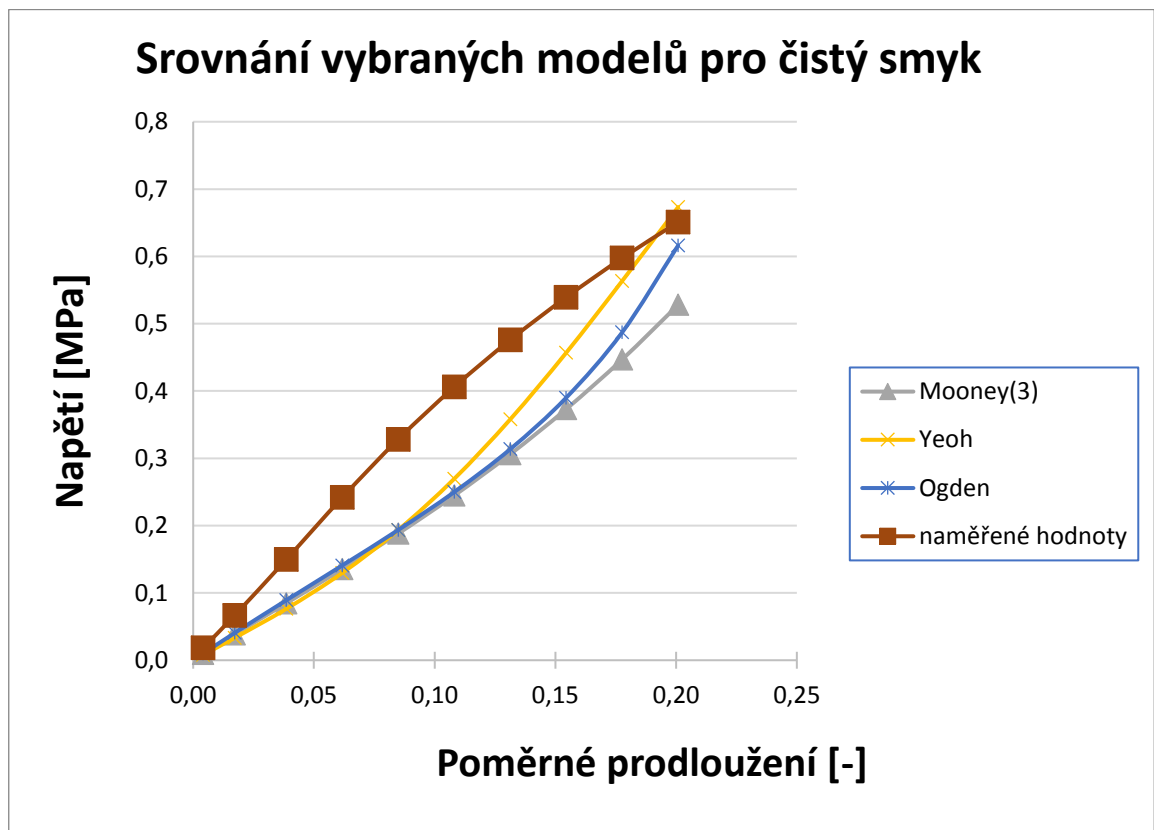
Obr. 81 Porovnání vybraných modelů hodnotou posunutí v ose x



Obr. 82 Graf Srovnání vybraných modelů pro jednoosý tah



Obr. 83 Graf Srovnání vybraných modelů pro dvouosý tah



Obr. 84 Graf Srovnání vybraných modelů pro čistý smyk

ZÁVĚR

Výběr vhodného materiálového modelu je nezbytným předpokladem pro správnou predikci mechanického, teplotního a jiného zatížení libovolných výrobků. Určité modely, které se dříve využívaly, mohou být už dnes zapomenuty, jelikož byly nahrazeny jinými, adaptovanými modely. Předmětem zadané diplomové práce bylo stanovení vhodného materiálového modelu pro numerický model pneumatiky se zaměřením na hyperelastické materiálové modely.

V teoretické části práce bylo popsáno funkce pneumatik, jejich konstrukce a samotná výroba. Dále bylo popsáno, co jsou elastomery a jejich vlastnosti včetně vlastnosti hyperelasticity. Následoval výčet současných hyperelastických modelů, výběr programu pro řešení diplomové práce.

V praktické části byla navržena 2D pneumatika s výztuhami sloužené z kordů a tkaniny, která byla zatížena vnitřním tlakem 2 bary. Byly popsány okrajové podmínky, nastavení materiálů, nastavení výpočtu. Poté byl model pneumatiky podroben výpočtu v programu Marc mentat. V další části byl zjištěn vliv tuhosti materiálu gumy na vybrané parametry pneumatiky. Následovalo odzkoušení různých hyperelastických modelů na materiálu gumy u modelu pneumatiky. V poslední části došlo ke srovnání jednotlivých hyperelastických modelů vzhledem k naměřeným datům materiálu gumy a byly vybrány 3 nejvhodnější hyperelastické modely.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MARCÍN, Jiří a Petr ZÍTEK. Pneumatiky. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, 492 s. Gumárenské výroby.
- [2] KOUTNÝ, František. Konstrukce výrobků: geometrie a mechanika pneumatik. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 139 s. ISBN 978-80-7318-796-5
- [3] TOMIS, František. Gumárenská a plastikářská technologie: zpracovatelské procesy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1987, 289 s.
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. Gumárenské suroviny a jejich zpracování. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009, 199 s. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [5] DVOŘÁK, Z. Zpracovatelské procesy gumárenské pro konstrukční směry [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Zlín: 2011. 182 s. [cit. 1. 3. 2017]. Dostupné z WWW:< <http://www.utb.cz/file/53155/>>
- [6] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. Elastomerní konstrukční materiály. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2009, 93 s. ISBN 978-80-02-02155-1.
- [7] AUTOLEXICON [online]. [cit. 1. 3. 2017] Dostupný z WWW: <<http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky>>
- [8] MSCSOFTWARE [online]. [cit. 1. 5. 2017] Dostupný z WWW: <<http://www.mscsoftware.com/product/marc>>
- [9] MSCSOFTWARE [online]. [cit. 1. 5. 2017] Dostupný z WWW: <<http://www.mscsoftware.com/marc-student-edition>>
- [10] WIKIPEDIE [online]. [cit. 4. 3. 2017] Dostupný z WWW: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/17/Torus.png/220px-Torus.png>>
- [11] MSCSOFTWARE [online]. [cit. 5. 5. 2017] Dostupný z WWW: <http://www.geology.um.mine.edu/user/scott_jhanson/share/MarcDocs/MarcDocs/docs/volb/volb.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

c	<i>materiálová konstanta [-]</i>
E	<i>modul pružnosti v tahu [MPa]</i>
G	<i>objemový modul ve smyku [MPa]</i>
k	<i>Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]</i>
K	<i>objemový modul pružnosti [MPa]</i>
J	<i>poměrná objemová deformace [-]</i>
n	<i>počet polymerních řetězců [-]</i>
T	<i>teplota [$^{\circ}C$]</i>
W	<i>deformační energie [J]</i>
W_{vol}	<i>adaptivní člen práce [J]</i>
α_i	<i>materiálová konstanta [-]</i>
λ	<i>protažení [mm]</i>
λ_L	<i>limitní protažení [mm]</i>
μ	<i>poissonovo číslo [-]</i>
μ_i	<i>materiálová konstanta [-]</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Toroid [10].....	11
Obr. 2 Pneumatika pro osobní (a) a nákladní (b) automobil	12
Obr. 3 Základní konstrukční typy pláště pneumatik	13
Obr. 4 Konstrukce pláště pneumatiky.....	15
Obr. 5 Korunní kordová vrstva	16
Obr. 6 Běhoun.....	16
Obr. 7 Kostra.....	17
Obr. 8 Bočnice	17
Obr. 9 Vnitřní gumová vrstva	17
Obr. 10 Patka	18
Obr. 11 Patní lano	18
Obr. 12 Kaučukovník brazilský a přírodní kaučuk.....	20
Obr. 13 Strukturní vzorec butadien.....	21
Obr. 14 Strukturní vzorec	21
Obr. 15 Strukturní vzorec Butadien-.....	22
Obr. 16 Strukturní vzorec	22
Obr. 17 Schéma míchání kaučukové směsi	27
Obr. 18 Řez hnětacím strojem	28
Obr. 19 Hnětič Rotomill	28
Obr. 20 Linka na vytlačování bočnic.....	29
Obr. 21 Kulatá konfekce	30
Obr. 22 Polokulatá konfekce	31
Obr. 23 Plochá konfekce.....	31
Obr. 24 Závislost napětí a deformace	37
Obr. 25 a) jednoosý tah, b) dvouosý tah, c) čistý smyk.....	42
Obr. 26 Pracovní plocha programu Marc Mentat 2015	45
Obr. 27 Rebar.....	46
Obr. 28 Graf naměřených hodnot pro jednoosý tah, dvouosý tah a čistý smyk	50
Obr. 29 Náčrt pneumatiky	51
Obr. 30 Náčrt pneumatiky s vyznačenými výztuhami.....	52
Obr. 31 Vysíťovaný model pneumatiky	53
Obr. 32 Mesh 2-D Rebar.....	54

Obr. 33 Vysíťovaný model výztuh	54
Obr. 34 Vysíťovaný model	55
Obr. 35 Okrajová podmínka 1	56
Obr. 36 Nastavení okrajové podmínky 1	57
Obr. 37 Okrajová podmínka 2	58
Obr. 38 Nastavení okrajové podmínky 2	59
Obr. 39 Okrajová podmínka 3	60
Obr. 40 Nastavení okrajové podmínky 3	61
Obr. 41 Tables.....	62
Obr. 42 Table biaxial	62
Obr. 43 Table uniaxial	63
Obr. 44 Table planar shear.....	63
Obr. 45 Material Properties	64
Obr. 46 Exp. data fix.....	64
Obr. 47 Elastomer data fit.....	64
Obr. 48 Control parameters	65
Obr. 49 Nastavení materiálu gumy	66
Obr. 50 Rebar tkaniny.....	67
Obr. 51 Rebar kordu 1	67
Obr. 52 Rebar kordu 2	67
Obr. 53 Nastavení materiálu tkanina	67
Obr. 54 Nastavení materiálu kordy.....	68
Obr. 55 Nastavení Loadcase	69
Obr. 56 Nastavení Job properties.....	70
Obr. 57 Nastavení Job parameters	70
Obr. 58 Nastavení Analysis option.....	71
Obr. 59 Run job	71
Obr. 60 Posunutí v ose x.....	72
Obr. 61 Posunutí v ose y.....	72
Obr. 62 Poměrné prodloužení.....	73
Obr. 63 Von Misesovo napětí.....	73
Obr. 64 Graf redukovaných hodnoty elastomeru.....	74
Obr. 65 Závislost nastavených hodnot napětí v materiálu na posunutí v ose x.....	75

Obr. 66 Závislost nastavených hodnot napětí v materiálu na posunutí v ose y.....	76
Obr. 67 Závislost nastavených hodnot napětí v materiálu na objemovém modulu pružnosti	76
Obr. 68 Graf materiálových hodnot modelu Neo-Hokken	77
Obr. 69 Graf materiálových hodnot modelu Mooney(2)	77
Obr. 70 Graf materiálových hodnot modelu Mooney(3)	78
Obr. 71 Graf materiálových hodnot modelu Yeoh	78
Obr. 72 Graf materiálových hodnot modelu Ogden	79
Obr. 73 Graf materiálových hodnot modelu Arruda-Boyce	79
Obr. 74 Graf materiálových hodnot modelu Gent	80
Obr. 75 Porovnání jednotlivých modelů hodnotou posunutí v ose x.....	81
Obr. 76 Porovnání jednotlivých modelů hodnotou posunutí v ose y.....	81
Obr. 77 Graf Srovnání jednotlivých modelů pro jednoosý tah.....	82
Obr. 78 Graf Srovnání jednotlivých modelů pro dvouosý tah.....	84
Obr. 79 Graf Srovnání jednotlivých modelů pro čistý smyk	86
Obr. 80 Porovnání vybraných modelů hodnotou posunutí v ose x.....	89
Obr. 81 Porovnání vybraných modelů hodnotou posunutí v ose x.....	89
Obr. 82 Graf Srovnání vybraných modelů pro jednoosý tah	90
Obr. 83 Graf Srovnání vybraných modelů pro dvouosý tah.....	90
Obr. 84 Graf Srovnání vybraných modelů pro čistý smyk	91

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro elastomer	48
Tabulka 2 Redukované hodnoty pro elastomer	74
Tabulka 3 Vliv tuhosti elastomeru na vybrané parametry	75
Tabulka 4 Vypočítané hodnoty hyperelastických materiálových modelů	80
Tabulka 5 Rovnice lineární regrese modelů pro jednoosý tah	83
Tabulka 6 Seřazení jednotlivých modelů dle vhodnosti pro jednoosý tah	83
Tabulka 7 Rovnice lineární regrese modelů pro dvouosý tah	85
Tabulka 8 Seřazení jednotlivých modelů dle vhodnosti pro dvouosý tah	85
Tabulka 9 Rovnice lineární regrese modelů pro čistý smyk	87
Tabulka 10 Seřazení jednotlivých modelů dle vhodnosti pro čistý smyk	87
Tabulka 11 Vybrané vypočítané hodnoty hyperelastických materiálových modelů ..	88