

# **Analýza materiálových charakteristik hyperelastické pryžové obruče pojezdového kola**

Bc.Martin Talafa

---

Diplomová práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav fyziky a mater. inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin TALAFA**  
Osobní číslo: **T10351**  
Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Téma práce: **Analýza materiálových charakteristik hyperelastické pryžové obruče pojezdového kola**

Zásady pro vypracování:

- 1. Úvod do problematiky.**
- 2. Vypracování literární rešerše, základní východiska pro praktickou a teoretickou část.**
- 3. Vyhodnocení získaných a naměřených materiálových charakteristik.**
- 4. Výpočet napjatosti hyperelastické pryžové obruče pojezdového kola pomocí MKP.**
- 5. Vyhodnocení a porovnání výsledků s návrhy pro aplikaci v praxi.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **BELYTSCHKO, T.LIU,T.W.MORAN,B.:** Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, John Wiley&Sons Ltd.,2001.
2. **MEISSNER,B. a ZILVAR,V.**Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, SNTL praha,1987.
3. **SCHÄTZ,M.**Kaučuk,STNL Praha,1965.
4. **MORTON,M.**Rubber technology, Van Nostrand Reinhold Company, New York,1973.
5. **ZIENKIEWICZ,O.C.,TAYLOR,R.L.,**Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics(6th Edition),Elsevier,2005.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Antonín Polášek, CSc.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:


**7. května 2012**

Ve Zlíně dne 13. února 2012



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



  
Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně .....

.....

---

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá interaktivním chováním navulkanizované hyperelastické pryžové obruče pojezdového kola při zatížení. V práci je uvedena technologie výroby pojezdových kol, popis zkušebních metod a získané výsledky měření pro dva typy pryžových směsí. V praktické části je provedený výpočet stavů napjatosti pojezdového kola pomocí metody konečných prvků. V závěru je provedena analýza výsledků a porovnání obou typů směsí s doporučením pro výrobu a provoz plných pryžových obručí pojezdových kol.

**Klíčová slova:** hyperelastická, kaučuková směs, pryž, pojezdové kolo, tenzor napětí, stav napjatosti, tenzor deformace, modul pružnosti, metoda konečných prvků.

## **ABSTRACT**

Interactive behaviour of a vulcanized hyperelastic solid rubber ring - a part of wheel - at loading has been studied in this dissertation. Production technology of wheels, description of testing methods and results of measuring for two kinds of rubber compounds are given. In the practical part of the dissertation a state of stress computation has been carried out for the wheel using the Finite element method. Analysis of results, comparison of both compounds and recommendation for manufacture and service of solid rubber rings – wheels – are given.

**Keywords:** hyperelasticity, rubber compound, rubber, wheel, stress tensor, state of stress, strain tensor, modulus of elasticity, finite element method.

Na tomto místě bych rád vyjádřil své poděkování vedoucímu diplomové práce panu Ing. Antonínu Poláškovu CSc. za jeho odborné vedení, věcné připomínky, rady a za profesionální přístup při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval firmě *WICKE.cz* za poskytnutí směsí a firmě *K.P.R. Engineering, s.r.o.* za poskytnutí softwarového a hardwarového vybavení. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor. Dále prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 PROBLEMATIKA POJEZDOVÉ TECHNIKY</b> .....	<b>12</b>
1.1 POJEZDOVÉ KOLO .....	13
1.1.1 Základní klasifikace .....	13
1.1.2 Funkce pryžové obruče .....	14
1.2 TECHNOLOGICKÝ PROCES POGUMOVÁNÍ POJEZDOVÉHO KOLA .....	15
1.2.1 Úprava disků před pogumováním .....	15
1.2.2 Nanášení adhezní vrstvy .....	15
1.2.3 Příprava nálože z KS a konfekce.....	16
1.2.4 Lisování.....	16
1.2.4.1 Vulkanizace .....	18
1.2.5 Kontrola hotových výrobků .....	19
1.3 KAUČUK.....	20
1.3.1 Přírodní kaučuk (NR).....	21
1.3.2 Syntetický kaučuk .....	22
1.4 TECHNICKÁ PRYŽ .....	23
1.5 ELASTICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ.....	24
1.5.1 Ideální elasticita .....	24
1.5.2 Kaučuková elasticita .....	26
1.6 HYPERELASTICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ .....	28
1.6.1 Konstitutivní popis hyperelastických materiálů.....	29
1.6.2 Konstitutivní modely popisující hyperelastické chování .....	30
1.7 ZKUŠEBNÍ METODY .....	33
1.7.1 Tahová zkouška.....	33
1.7.2 Zkouška tvrdosti.....	35
1.7.3 Zkouška odrazové pružnosti .....	37
1.8 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>42</b>
<b>2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>43</b>
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>44</b>
3.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	44
3.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	47
3.2.1 Výsledky měření tahové zkoušky .....	48
3.3 LINEARIZACE TAHOVÝCH KŘIVEK .....	50
3.3.1 Linearizace tahových křivek ze směsi 2500_225.....	52
3.3.2 Linearizace tahových křivek ze směsi 2500_224.....	55
3.4 STANOVENÍ ODRAZOVÉ PRUŽNOSTI.....	58
3.5 STANOVENÍ TVRDOSTI.....	59
3.6 MODELOVÁNÍ POJEZDOVÉHO KOLA A VÝPOČET NAPJATOSTI POMOCÍ MKP .....	60
3.6.1 Modelování pojezdového kola .....	60
3.6.2 Deformace a napětí pro pojezdové kolo s obručí z tvrdší směsi.....	65



3.6.3	Deformace a napětí pro pojezdové kolo s obručí z měkčí směsi .....	71
3.7	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	77
3.7.1	Výsledky tahové zkoušky .....	77
3.7.2	Výsledky odrazové pružnosti a tvrdosti .....	78
3.7.3	Výsledky výpočtu tenzoru napětí a deformace pomocí MKP .....	79
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>82</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>85</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>88</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>91</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>		<b>93</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>		<b>94</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>		<b>95</b>

## ÚVOD

Široká škála elastických vlastností pryže je rozhodující při volbě vhodných materiálů aplikovaných v průmyslu. Na rozdíl od běžných konstrukčních materiálů lze u pryží měnit vlastnosti ve velkém rozsahu. Toho lze dosáhnout vhodnou skladbou kaučukové směsi. Tyto parametry jsou rozhodující při výrobě gumárenských produktů, jejichž funkce je podmíněna vlastnostmi pro pryž tak typickými. Gumárenský průmysl se v současnosti nezabývá jen výrobou samotných pryžových výrobků (spojky, tlumící prvky, pneumatiky...), ale věnuje se i technologii pogumování různých kovových nebo plastových dílců. V našem případě se jedná o výrobu pojezdových kol ve smyslu navulkanizování pryžové obruče na kovový disk.

Diplomová práce se zabývá hyperplastickým chováním pryžové obruče navulkanizované na ocelovém pojezdovém kole. V teoretické části je popsána konstrukce pojezdového kola a je zde popsán podrobný proces výroby. Dále jsou uvedeny zkušební metody, které slouží k získání základních materiálových charakteristik. Podle požadavků norem byla provedena tahová zkouška, měření tvrdosti a odrazové pružnosti. Jelikož se pryž chová jako hyperplastický materiál, jsou v teoretické části popsány matematické modely hyperelastivity a je stručně naznačen matematický popis metody konečných prvků (MKP). V praktické části jsou prezentovány výsledné materiálové charakteristiky experimentálně naměřené pro dva typy kaučukových směsí, které poskytla firma Wicke.cz. Jedná se o dva typy směsí, kdy jedna se používá standardně při výrobě pojezdového kola a druhá je srovnávací a slouží pro porovnání. Dále jsou výsledky zpracovány pro potřeby linearizovaného Mooney-Rivlinova dvouparametrového modelu pojezdového kola. Následně je použit software SAMCEF a Samcef Field pro výpočet rozložení tenzoru deformace a napětí pomocí metody konečných prvků.

V závěru jsou porovnány oba typy zvulkanizovaných směsí z pohledu naměřených materiálových charakteristik a z pohledu výsledků získaných při výpočtech pomocí metody konečných prvků.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 PROBLEMATIKA POJEZDOVÉ TECHNIKY

Prudký rozvoj výroby pneumatik na přelomu 19. a 20. století dal vzniknout novým odvětvím zaměřených především na přepravu a manipulaci těžkých nákladů. Jedná se především o pojezdová kola, která by se dala definovat jako vyměnitelná stavební součást přepravovacích strojů a zařízení s velkou škálou nosností. Pogumovaná kola nacházejí uplatnění u speciálních dopravních prostředků, jako jsou vozíky pro těžké náklady, vozidla pro vnitrozávodní dopravu, akumulátorové vozíky, ale i součásti strojních zařízení. Využití nemusí být jen v průmyslu. Tyto výrobky se stávají i součástí každodenního využití. Setkáváme se s nimi např. v domácnosti jako součást nábytku nebo sedacích souprav, ve zdravotnictví u nemocničních lůžek nebo v supermarketech u nákupních vozíků.

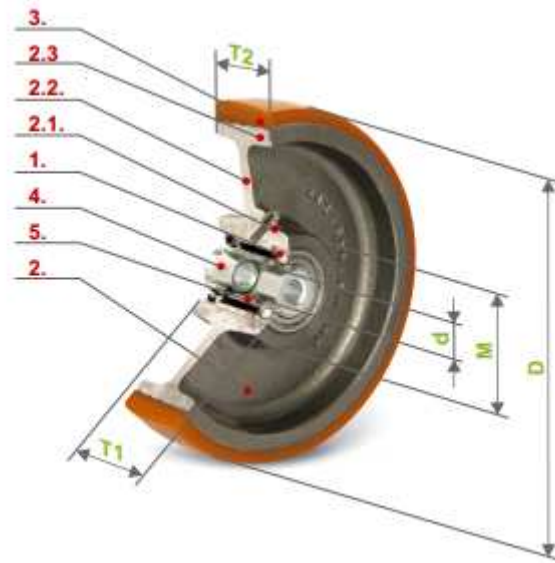
Velký sortiment přírodních a syntetických kaučuků umožnil vyrábět pogumovaná pojezdová kola s pestrou paletou používaných tvrdostí, a to v rozsahu od 50 do 90 Sh. Pryžové povlaky na ocelových ráfcích mají v porovnání s do té doby používanými materiály tyto výhody:

- Velký rozsah tvrdostí,
- Velké množství směsí s různou odolností proti korozi,
- Výborné elastické vlastnosti,
- Odolnost proti opotřebení,
- Dostatečnou tepelnou odolnost,
- Odolnost proti zatížení v tlaku,
- Dobrou soudržnost pryžové vrstvy se základním materiálem.

Plné pryžové obruče se staly v průběhu let nejpoužívanějším materiálem při potahování a následném navulkanizování na kovové disky. Využívá se pro to dvou základních charakteristik. Obruč může být podrobena velkým deformacím působením vnějších sil, aniž by docházelo k jejímu porušení. Druhá vlastnost je dobré tlumení a schopnost vracet se do původního stavu po uvolnění těchto působících sil. Z toho plyne, že si obruč zachovává svůj toroidní tvar a může dále plnit svůj účel. [1],[2],[3]

## 1.1 Pojezdové kolo

Jedná se o výrobek kruhové konstrukce otočné kolem své osy. Kruhový pohyb se zajišťuje přímým uložením nebo pomocí ložiska. Obruč je vnější částí kola. Její součástí je tzv. běhoun, který je v přímém kontaktu s vozovkou. Na následujícím obrázku můžeme vidět konstrukci pojezdového kola.[4]



**Obr.č. 1.** Schéma pojezdového kola s ložiskem[4]

Popis obrázku:

- |                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| 1. Ložisko,           | D - Průměr kola,            |
| 2. Disk,              | d - Vnitřní průměr ložiska, |
| 2.1. Náboj s maznicí, | T1 - Šířka náboje,          |
| 2.2. Žebro,           | T2 - Šířka obruče,          |
| 2.3. Ráfek,           | M - Průměr náboje.          |
| 3. Obruč, běhoun,     |                             |
| 4. Distanční vložka,  |                             |
| 5. Mezikroužek,       |                             |

### 1.1.1 Základní klasifikace

Pojezdová kola se mohou dělit podle nejrůznějších kritérií. Proto budou uvedeny pouze základní dělení podle funkce, druhu ložisek, materiálu obruče a uložení.

*Základní rozdělení podle funkce:*

- Pojezdová kola samostatná,
- Pojezdová kola otočná,
- Pojezdová kola pevná.

*Rozdělení podle druhu ložisek:*

- Kuličkové ložisko – je vhodné k častému provozu, při vyšších rychlostech a většímu zatížení má plynulý chod.
- Kluzné ložisko – je vhodnější pro nízké rychlosti, lépe snáší nárazy, může se použít i ve vlhkém prostředí.
- Jehličkové (valivé) ložisko – obdobné vlastnosti jako u kluzného.

*Rozdělení podle materiálu obruče:*

- Plná guma – vyznačuje se malými vibracemi při pojezdu, má hladký chod a za předpokladu hladkého povrchu menší odpor než pneumatika.
- Pneumatika – malý odpor na nerovném povrchu, výborně tlumí nárazy způsobené nekvalitním povrchem.
- Polyamid – vysoké nosnosti, odolný kyselému a vlhkému prostředí, určen především na hladké povrchy.
- Polyuretan – je odolný vůči kovovým částicím, umožňuje vysoká zatížení při nízkých hodnotách opotřebení.[5]

### **1.1.2 Funkce pryžové obruče**

Funkce pryžové obruče je obdobná jako u klasické pneumatiky. Obruč zajišťuje styk s vozovkou nebo s jiným povrchem pomocí běhounu. Má za úkol přenášet všechny síly, vycházející z pojezdového zařízení na povrch, po kterém se pohybuje a naopak. Z toho důvodu musí obruč plnit následující základní funkce:

- Přenášet svislé, tečné a boční síly mezi kolem a povrchem. Svislé síly jsou způsobeny vahou pohybového aparátu, tečné síly vznikají při akceleraci (zrychlování a brzdění), boční síly se projevují při změnách směru (zatačení),
- Umožnit pohyb soustavy valením,
- Tvořit součást stability (pérování).[6]

## 1.2 Technologický proces pogumování pojezdového kola

Proces pogumování se dá aplikovat na různé materiály. Jedná se o ocelové, litinové, hliníkové nebo plastové disky. K pogumování se používá kaučuková směs předepsané kvality. Technologický postup gumárenské výroby se skládá z několika po sobě jdoucích kroků, se kterými se nyní obeznámíme. V našem případě se jedná o litinový ráfek s přírubovým uložením. To znamená, že kola mají na žeburu vyvrtány otvory, kterými se upevní na čep nápravy nebo případně na náboj. Toto uložení je vhodné pro přenos krouticího momentu.

### 1.2.1 Úprava disků před pogumováním

Každý kus určený k pogumování má tvar a rozměry, které jsou v souladu s technickou dokumentací.

Úprava kol se provádí ve dvou krocích. Nejdříve dochází k odmašťování. To se provádí tlakovým postřikem horkou vodní lázní, která obsahuje čisticí prostředek o známé koncentraci a probíhá v uzavřeném zařízení. Po vyčerpání odmašťovacího účinku lázně se musí doplnit. Proto se hlídá koncentrace lázně a obsah ropných látek v lázni.

Druhým krokem je otryskávání povrchu (opískování). Provádí se nejčastěji v pískovacích zařízeních s metacími koly. Jako abrazivo se používá ocelová drť, ale mohou být použity i jiné podle druhu materiálu disku. Po otryskání se kontroluje, je-li zdrsnění povrchu rovnoměrné. Dílce se poté zbaví prachu za pomoci tlakového vzduchu. Tímto postupem se dosahuje jak zdrsnění tak zvětšení plochy. To přispívá k lepší soudržnosti pryže s kovem. Nevýhodou je zvětšení náchylnosti ke korozi disku.[2]

### 1.2.2 Nanášení adhezivní vrstvy

Adhezivní prostředky jsou určeny ke spojování pryže s kovem. Spojování se provádí za zvýšených teplot. Nejčastěji se používá dvouvrstvý systém nanášení, který je tvořen spodním základním nátěrem a druhým vrchním nátěrem. Natírají se pouze řádně očištěné plochy disku zbavené veškerého prachu a mastnoty.

- První vrstva je základní. Dává spojům mezi kovem a pryží potřebnou stabilitu proti vlivům koroze. Základní nátěr se aplikuje v tloušťce několika  $\mu\text{m}$ . Schnutí této vrstvy lze urychlit sušením za zvýšené teploty.

- Druhá vrstva bývá univerzální pojivo na bázi různých typů kaučuků. Jedná se o pojivo schopné spojovat celou škálu kaučukových směsí s kovy nebo s polárními plasty.

System dvou vrstev nátěrů váže během vulkanizace kaučuk téměř na všechny kovy a jejich slitiny a také na celou řadu plastů. Nejčastější adhezní přípravky jsou na bázi chemosilu. Průmyslově se používá chemosil 211 (základní nátěr) a chemosil 411.[7]

### 1.2.3 Příprava nálože z KS a konfekce

Pryžová obruč se vyrábí z kaučukové směsi. Kaučukem a jeho vlastnostmi se budeme zabývat samostatně v jedné z následujících kapitol. Proto přejdeme rovnou k výrobě pásků pro nálože.

Pásky se připravují na výrobní lince, která se skládá z ohřívacího dvouválce, kalandru, vzduchového chlazení a odkládacího pásu. KS ve tvaru desek se hněte v ohřívacím dvouválci o pracovní teplotě. Pak postupuje ke zpracování do kalandru, ze kterého se následně vytahují pásy o potřebné tloušťce. Dále se seká na potřebnou délku a ukládá se k dalšímu zpracování. Je velice důležité při tomto postupu dodržovat pracovní teplotu. Ta záleží na typu kaučukové směsi. Teplota se pohybuje řádově od 50 do 90 °C.

Dalším krokem při výrobě pogumovaných pojezdových kol je konfekce. Připravené disky se zkontrolují a případné vady se odstraní. Mezi časté závady patří nános adhezního nátěru mimo plochy určené k pogumování. Ten se odstraní broušením a následným tlakovým vzduchem se odstraní prach. Na disky se poté nabalují připravené pásy ve stanoveném množství, které mají patřičné rozměry. Aby se zabezpečila dostatečná výplň formy a optimální velikost přetoků, musí být hmotnost nálože asi o 5 až 10% větší než hmotnost nálože potřebná k pogumování disku. Při navíjení pásků se dbá na čistotu styčných ploch nálože s kovem.

### 1.2.4 Lisování

Lisování je krok, ve kterém dochází ke konečnému tvarování a k přilnutí směsi na disk. Děje se tak ve vulkanizačních lisech. Jedná se o zařízení, kde jsou upevněny formy. Forma je rozdělena na spodní a vrchní část. Spodní část je připevněna na výsuvné základní desce. Ta je opatřena výsuvným a vyrážecím zařízením, díky kterému se vylišovaný výrobek vytlačí z formy ven. Postup lisování je následující:



1. Před každým lisováním musí být forma správně vyčištěná a přehřátá na požadovanou pracovní teplotu. Ta je dána druhem směsi.
2. Opracovaný disk s náloží se správným způsobem vloží do vysunuté spodní části formy. Ta se pomocí vodících lišt zasune do vulkanizačního lisu a ten se uzavře.
3. Po uzavření lisu probíhá nahřívání nálože a následuje tlakování, které se několikrát opakuje. Tím se dosáhne odvzdušnění. Po skončení procesu se lis hermeticky uzavře pod pracovním tlakem, který může dosahovat i několik desítek MPa. Po stanovený čas probíhá vulkanizace.
4. Po ukončení vulkanizace se vyndá pogumovaný díl a vyčistí se forma od zbytků pryže. Celý proces se opakuje.
5. U hotového výlisku se ještě za tepla odstraní přetoky, především na dělicí rovině.
6. Výrobek postupuje ke kontrole.[8],[9]

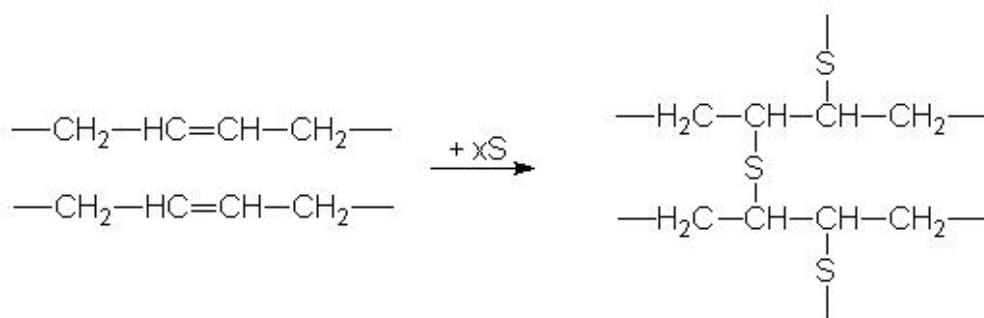


*Obr.č. 2.Vulkanizační lis[10]*

### 1.2.4.1 Vulkanizace

Proces vulkanizace je fyzikálně chemický děj, při kterém dochází ke změnám struktury u elastomerů. Děje se tak účinkem zvýšené teploty a vulkanizačních činidel. V jejím průběhu ztrácí kaučuková směs plasticitu a mění se v pryž, která se vyznačuje vysokou elasticitou. Materiál se vyznačuje vysokou pevností, velmi nízkou rozpustností v rozpouštědlech (zvulkanizovaný kaučuk pouze bobtná), má velkou odolnost proti oděru a větší pružnost. Zachovává si svou tuhost i ohebnost ve velkém rozsahu teplot. Jednou z nevýhod zvulkanizovaného kaučuku je ztráta tažnosti.

Pro zvulkanizování kaučukových směsí se používají vulkanizační činidla na bázi síry. Mezi makromolekulami se vytváří příčné vazby (sírné můstky). Při reakci kaučuku a síry mohou vznikat volné radikály, proto se jedná o radikálový proces. Používaná síra má strukturu osmičlenného kruhu ( $S_8$ ). Vlivem zvýšené teploty dojde k rozevření kruhu a vznikají tak volné radikály, které se vážou na molekuly kaučuku. Síra se navazuje na dvojné vazby nebo reaguje s vodíkem metylénové skupiny kaučuku. Tato reakce vede k vytvoření příčných vazeb mezi řetězci. Zjednodušené schéma tvorby příčných vazeb mezi řetězci je na následujícím obrázku.



**Obr.č. 3.** Schéma tvorby příčných vazeb[6]

Mezi kaučukem a sírou probíhá tato reakce až do vzniku prostorové struktury. Charakter těchto struktur pak určuje, jedná-li se o reakci intramolekulární nebo intermolekulární. Intramolekulární reakce je taková, která probíhá uvnitř molekuly. To znamená, že vulkanizační činidlo reaguje pouze s jedním molekulárním řetězcem kaučuku. Naopak reakce intermolekulární (mezimolekulární) probíhá mezi sírou a dvěma navzájem sousedícími řetězci kaučuku. Následnou rekombinací se pak vytváří příčná vazba.[7]

### *Optimum vulkanizace*

Vzhledem k tomu, že fyzikální vlastnosti se při vulkanizaci mění postupně, můžeme říct, že se jedná o děj závislý na čase. Rychlost fyzikálních charakteristik je ovlivněna několika atributy. Nejčastěji se jedná o typ použitého kaučuku, použití vulkanizačního systému, přísad nebo teploty.

Optimum vulkanizace můžeme obecně popsat jako stav, při kterém je dosaženo požadovaných fyzikálních vlastností pryže. V průmyslu, při výrobě různých pogumovaných kol (i jiných pogumovaných výrobků), je jednou z nejpoužívanějších metod stanovení optima vulkanizace metoda bobtnáním. Jedná se o nenáročnou poměrně rychlou a spolehlivou metodu. Základná kroky jsou tyto:

- 1) Z hotového výrobku se na několika místech odeberou zkušební tělíška (u disku, ve středu, u povrchu) a stanoví se jeho hmotnost. Hmotnost by neměla překročit 5g.
- 2) Tělíška se následně ponoří na 24 hod. do příslušného rozpouštědla (toluen atd.).
- 3) Po uplynutí stanovené doby se zkušební tělíška vyjmou z rozpouštědla a stanoví se jejich hmotnost. Následně se stanoví hmotnostní rozdíl.
- 4) Vypočte se procentní nárůst hmotností. Jsou-li hodnoty nárůstu v toleranci  $\pm 15\%$ , můžeme konstatovat, že je výrobek dobře z vulkanizovaný. [11],[12],[13]

#### **1.2.5 Kontrola hotových výrobků**

U hotových výrobků se provádí vizuální kontrola. Ta se řídí příslušnými ČSN, ČSN ISO a tzv. podnikovými normami, které stanovuje vedení podniku. Jedná se především o ČSN 63 3010 a ČSN ISO 63 0101.

Z hlediska správné funkčnosti výrobku jsou nepřijatelné vady následující:

- a) Trhliny nebo jiné necelistvosti, zalísované příměsi nebo jiný odpad,
- b) Nerovnosti povrchu: otevřené bubliny, propadliny, vrásky, nedolisované místa, nerovnosti způsobené vzduchem,
- c) Na rozhraní kovu a pryže nesmí být: zatržení přivulkanizované pryže na styku s kovem; zřetelné znečištění od separačního prostředku, pryže nebo chemosilu; odseparování pryže od disku.

Pogumovaná pojezdová kola, která nesplní výstupní kontrolu, jsou určeny k opětovnému zpracování. To znamená, že se odstraní vadná pryžová obruč a disk znovu podstoupí celý proces pogumování.

### 1.3 Kaučuk

Kaučuk je základní surovinou pro gumárenský průmysl. Tato surovina je průmyslu známa už od poloviny 18. století. Samotný kaučuk nemá ve světě průmyslu nikterak velké uplatnění. To nachází až s objevem vulkanizace v roce 1844, o kterou se zasloužil americký chemik Charles Goodyear. Tímto objevem se mezi průmyslovými surovinami dostává na přední pozice, protože svými vlastnostmi se odlišuje od ostatních používaných materiálů, jako je dřevo, kůže, beton, ocel, její slitiny a jiné materiály. Výrobky z kaučuku vynikají mnohými vlastnostmi, mezi které patří například velká elasticita, nepropustnost plynů, odolnost vůči chemikáliím, malou vodivostí (z toho plynou výborné elektroizolační vlastnosti).

Po strukturní stránce se jedná o nesíťovanou elastomerní makromolekulární látku, která vyniká vysokou zcela vratnou elasticou deformací. Ta se může pohybovat v řádu až několika stovek procent. Vzhledem k tomu, že je kaučuk relativně měkký s malým modulem pružnosti, tak vykazuje i za pokojové teploty vysokou ohebnost. Za kaučuk můžeme považovat každou polymerní látku, která má délku řetězce s vysokým polymeračním stupněm. Řetězce musí být natolik zapleteny mezi sebou, aby nedocházelo k viskóznímu toku. Jako důsledek snížené symetrie pozorujeme amorfní strukturu. Slabé mezimolekulární síly jsou příčinou relativně velké pohyblivosti segmentů. Teplota skelného přechodu se pohybuje pod hranicí  $-40^{\circ}\text{C}$ . Každý kaučuk musí umožnit řídké síťování, které ještě zlepšuje jeho vlastnosti. Síťováním se zabrání plastické deformaci při zatěžování a umožní se přechod od částečné plastické deformace k čistě vysokoelastické deformaci. Tyto materiály dále vykazují velkou houževnatost a vysokou odolnost proti odírání. Další vlastnosti se dají ovlivnit vhodnými přísadami do kaučukové směsi.

#### *Gumárenské směsi*

Každou gumárenskou směs tvoří vždy kombinace přísad s kaučukem. Za přísady můžeme považovat různé chemikálie (např. antidegradanty, plniva, změkčovadla, urychlovače aj.), které mají za úkol zlepšit zpracovatelnost směsi, zlepšit vlastnosti vulkanizátu tak, aby vyhovoval požadavkům a snížit náklady na jeho výrobu.

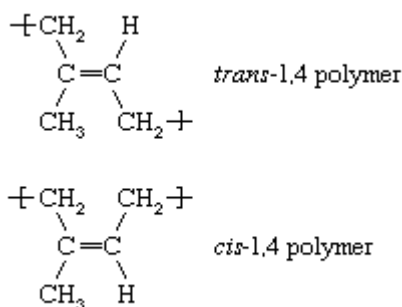
Pojem koncentrace je nahrazen počtem dílů na sto dílů kaučuku (dsk). Základem směsi je 100 dílů kaučuku. Typická gumárenská směs pro sírou síťované nenasycené kaučuky obsahuje na 100 dsk kaučuku:

- 0 – 4 dsk síry
- 5 dsk ZnO
- 2 dsk stearinu
- 0,5 – 3 dsk urychlovačů
- 1 – 3 dsk antioxidantů
- 0 – 150 dsk plniv
- 0 – 150 dsk změkčovadel

Kaučuk se dělí podle způsobu jeho získávání na dvě skupiny, a to na přírodní a syntetický. [8],[14],[15]

### 1.3.1 Přírodní kaučuk (NR)

Přírodní kaučuk se získává z brazilského kaučukovníku *Hevea brasiliensis*. Tato rostlina má ve své kůře síť mléčnic, které obsahují latex. Kůra stromu se nařezává a vytékající latex se sbírá. Ten se pak působením kyseliny (mravenčí nebo octová) nechá koagulovat. Vysrážený kaučuk se poté suší nebo udí. Přírodní kaučuk je svým složením 2- metyl-1,3-butadien a nachází se ve formách *cis*. Můžeme získat kaučuk i ve formě *trans* (gutaperča).



**Obr.č. 4.** *Strukturní vzorec přírodního kaučuku[33]*

Z přírodního kaučuku se vyrábí i některé speciální typy:

- Technicky klasifikovaný kaučuk,
- Výborně zpracovatelný kaučuk SP,
- Roubované polymery kaučuku,
- Cyklizovaný kaučuk
- Peptizovaný kaučuk,
- Práškový kaučuk a další.

### 1.3.2 Syntetický kaučuk

Syntetické kaučuky se začaly vyrábět s cílem nahradit kaučuky přírodní. Svými vlastnostmi mnohdy předcházejí vlastnosti přírodních kaučuků. Zvyšující se nároky na vlastnosti pryže dali vzniku nejrůznějším typům kaučuků. Z hlediska jejich použitelnosti je můžeme rozdělit na dvě složky. První jsou syntetické kaučuky pro všeobecné použití. Ty vynikají vysokou pevností, odolností proti oděru, nízkou hysterezí a vysokou odrazovou pružností. Mají ale špatnou odolnost proti stárnutí při zvýšených teplotách a špatnou odolnost proti ozonu. Proto je třeba používat většího množství antidegradantů. Druhým případem jsou speciální syntetické kaučuky nacházející uplatnění v inženýrských aplikacích.[1],[7]

*Tab.č. 1.Použití syntetických kaučuků ve vybraných výrobcích[1]*

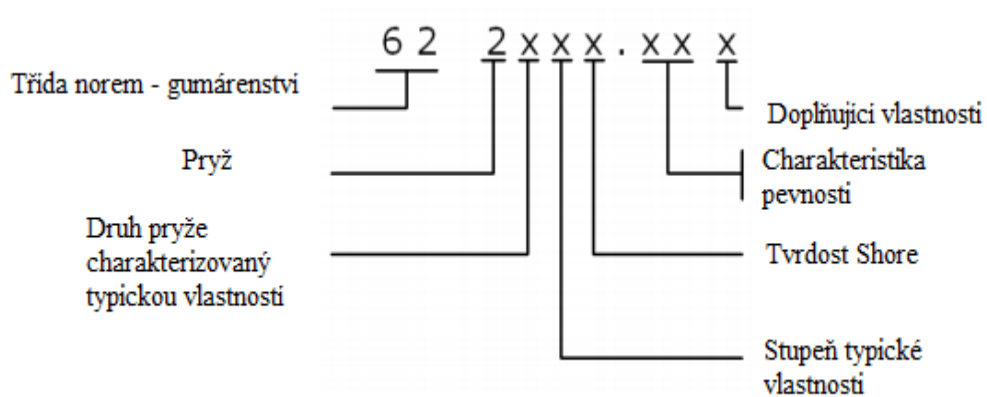
<b>Druh výrobku</b>	<b>Typ kaučuku</b>
<b>Pláště pro osobní automobily</b>	a) Studený butadienstyrenový + butadienstyrenový olejem nastavovaný b) Etylenpropylénový
<b>Dopravní pásy</b>	a) Chloroprenový b) Butadienový + izoprenový c) Etylénpropylénový
<b>Řemeny</b>	a) Chloroprenový b) Polyuretanový
<b>Plné obruče</b>	a) Studený butadienstyrenový + butadienstyrenový olejem nastavovaný b) Butadienový + izoprenový
<b>Pogumované válce</b>	a) Izoprenový + butadienový b) Chloroprenový, nitrilkaučuk c) Etylenpropylénový, polyuretanový, silikonový, fluorokarbonový
<b>Hadice</b>	a) Chloroprenový b) Studený butadienstyrenový olejem nastavovaný

## 1.4 Technická pryž

Převážná většina gumárenských produktů se vyrábí technologickým procesem zvaným tvářením. Děje se tak za zvýšených teplot ve vulkanizačních lisech. Konečné vlastnosti záleží na způsobu zpracování, na druhu použité kaučukové směsi a na obsahu plniv či jiných přísad a na stupni sesíťování. Základní dělení pryží je:

- Měkká pryž
- Polotvrdá pryž
- Tvrdá pryž

Na obrázku je značení technické pryže, které je normováno podle ČSN 62 0002:



*Obr.č. 5.Značení technické pryže[28]*

Podle účelu se technická pryž dělí na tyto základní výrobky:

- Vybavení pro pohyblivá zařízení,
- Vybavení pro dopravní zařízení pracující pod tlakem nebo vakuem,
- Pružné výrobky vystavené dynamickému namáhání,
- Pryžová těsnění pro statické namáhání,
- Elektroizolační materiál,
- Pryžové ochranné obklady chemického zařízení,
- Prostředky pro vzduchoplavbu a plavbu po vodě,
- Zboží denní spotřeby.[6]

## 1.5 Elastické chování elastomerů

### 1.5.1 Ideální elasticita

Je idealizovaný případ deformačního chování látek. Jedná se o okamžitou, časově nezávislou, dokonale vratnou, lineární deformaci. Ideální elasticita se projevuje u látek, jejichž částice jsou pevně uloženy v rovnovážných polohách (diamant, kov), kolem kterých tyto částice kmitají. Při působení napětí dojde k odsunutí částice ze své rovnovážné polohy. Tyto posuny jsou velmi malé a mohou být tedy rychlé a pouze do malých vzdáleností. To je důvod, proč se dosahuje jen malých deformací.

Látky vykazující elastické chování mají velký modul, který je téměř nezávislý na teplotě. Poissonův poměr se pohybuje v oblasti 0,25 – 0,33.

#### *Hookeův zákon*

Hookeův zákon můžeme definovat jako vztah mezi působící silou a následnou deformací. Mezi těmito veličinami platí v oblasti malých deformací přímá úměrnost. V tomto případě se konstanta úměrnosti nazývá modul pružnosti a nezávisí na rozměrech tělesa. Můžeme předpokládat těleso čtvercového průřezu  $A_0$ , o délce  $l$  a šířce  $a$ . Dále předpokládejme, že těleso je zhotoveno z izotropního ideálně elastického materiálu (tzn. v kterémkoliv jeho bodě a v kterémkoliv směru jsou elastické vlastnosti stejné). Zavádíme vnější sílu  $F$ , která působí na plochu průřezu  $A_0$ . Působením síly dochází k prodloužení délky o  $\Delta x$  a k zúžení šířky o  $\Delta y$ .

Proto zavedeme poměrné prodloužení  $\varepsilon_l$  definované jako:

$$\varepsilon_l = \frac{l + \Delta x - l}{l} = \frac{\Delta x}{l} \quad (1)$$

a příčné zkrácení  $\varepsilon_a$  definované jako:

$$\varepsilon_a = \frac{a - \Delta y - a}{a} = -\frac{\Delta y}{a} \quad (2)$$

Pro oblast pružných deformací platí vztah mezi poměrným prodloužením a příčným zkrácením, který se nazývá Poissonův poměr. Pro absolutně nestlačitelná tělesa může nabývat hodnoty 0,5.

$$\nu = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_l} \quad (3)$$



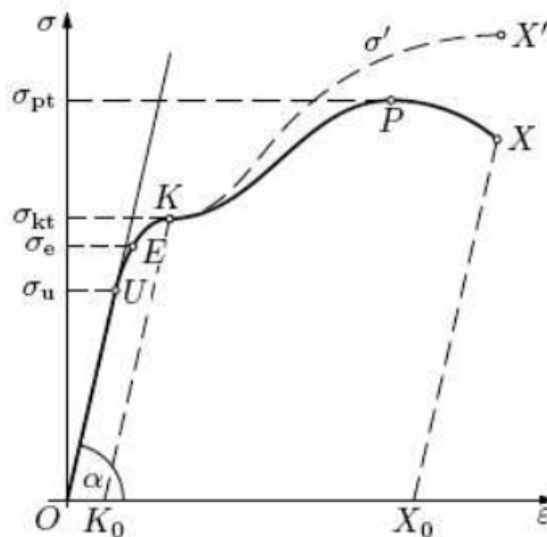
Hookeův zákon pro jednoosé namáhání můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

kde:  $E$  – je Youngův modul pružnosti v tahu,

$\sigma$  – je normálové napětí (síla  $F$  působící kolmo na plochu průřezu  $A$ ).

Závislost napětí na poměrném prodloužení při konstantní rychlosti zatěžování se nazývá tahová křivka. V malém rozsahu deformací se řídí Hookovým zákonem. Při větších deformacích vykazuje chování materiálu určitý odklon od tohoto zákona. Tahové diagramy různých materiálů mají vždy charakteristický průběh. Na následujícím obrázku je uveden příklad tahového diagramu houževnaté ocele.[17],[18]



**Obr.č. 6.** Tahový diagram – houževnatá ocel[19]

Popis tahové křivky:

1.  $\sigma_u$  je napětí na mezi úměrnosti – kde bod U je mez úměrnosti. Jedná se o oblast, pro kterou platí Hookeův zákon.
2.  $\sigma_e$  je napětí na mezi pružnosti – kde bod E je mez pružnosti. Vymezuje hranici, kdy je deformace ještě vratná. Po odlehčení napětí se deformace navrací zpět do původního stavu. Mez pružnosti se obvykle příliš neliší od meze kluzu.

3.  $\sigma_{kt}$  je napětí na mezi kluzu – kde bod K je mez kluzu. Překonáním kohezních sil vzniká v tomto bodě výrazná plastická deformace.
4.  $\sigma_{pt}$  je napětí na mezi na mezi pevnosti v tahu – kde bod P je mez pevnosti. Při dosažení bodu P dochází k trvalému poškození. Zatěžující síla dosahuje maximální hodnoty. Bod X znamená porušení celistvosti a v tomto bodě dochází k porušení (přetržení) tělesa.[19]

Tahová křivka může být rozdělena do tří různých oblastí:

1. O – E: Oblast elastických deformací
2. E – P: Oblast rovnoměrných pružně plastických deformací
3. P – X: Oblast nerovnoměrných pružně plastických deformací

### 1.5.2 Kaučuková elasticita

U kaučukové elasticity se na rozdíl od ideálně elastických látek dosahuje několikanásobně vyšších deformací. Protažení tak může dosahovat i několika set procentního nárůstu než byla původní délka. Tvar závislosti napětí na deformaci má obvykle charakteristický esovitý průběh a je lineární pouze v oblasti malých deformací při velmi malých protaženích. Modul pružnosti je mnohonásobně menší než u kovových elastických materiálů. Elastické deformace zde probíhají se zpožděním. Je to způsobeno vnitřním viskózním odporem kaučukové sítě. Z toho je patrná časová závislost deformace. Usuzujeme tedy, že u kaučukové elasticity se projevuje současně viskózní projev i elastické chování. Tomuto jevu se říká viskoelastické chování.[18]

Následky viskoelastického chování:

1. *Creep* – český výraz pro tento jev je tečení. Jedná se o růst deformace s časem za konstantního napětí. Při zatížení tělesa konstantním napětím se rychle deformuje. Vlivem časového průběhu deformace narůstá. Při odstranění konstantního zatížení dochází k tzv. zotavení tělesa (návrat do původního tvaru). Nepochází však k úplnému zotavení. Působí zde zbytková deformační energie, která se uvolňuje až postupem času.

2. *Relaxace napětí při konstantní deformaci* – dochází k protažení tělesa na určitou hodnotu konstantní deformace, která se udržuje. Napětí, kterým udržujeme tuto hodnotu konstantní deformace, začne v průběhu času klesat, dokud se neustanoví na nějaké rovnovážné hodnotě. Říkáme, že se jedná o relaxaci napětí.
3. *Hysterezní jev* – vykazují všechny elastomerní látky schopné velkých vratných deformací. Deformujeme-li těleso na určitou hodnotu deformace působením jistého napětí, zjistíme, že při zpětném uvolnění deformace napětí neklesá po stejné křivce. Klesá po jiné křivce, která je v celém rozsahu nižší než při zatěžování. Vzniká hysterezní smyčka. K tomuto jevu dochází v důsledku ztrát deformační energie a její přeměnu v energii tepelnou.

Velikost hystereze pak určíme pomocí poměrné statické hystereze. Tento poměr bývá často vyjadřován v [%]:

$$H_{\varepsilon} = \frac{A_h}{A_{\varepsilon}} \cdot 100 \quad (5)$$

Kde:

$H_{\varepsilon}$  - je poměrná statická hystereze [%],

$A_h$  – je plocha hysterezní smyčky,

$A_{\varepsilon}$  – je plocha hysterezní smyčky, která udává celkovou práci potřebnou k provedení deformace.

Tahovou pružnost materiálu udává poměr mezi prací vrácenou  $A_r$  a prací dodanou  $A_{\varepsilon}$ :

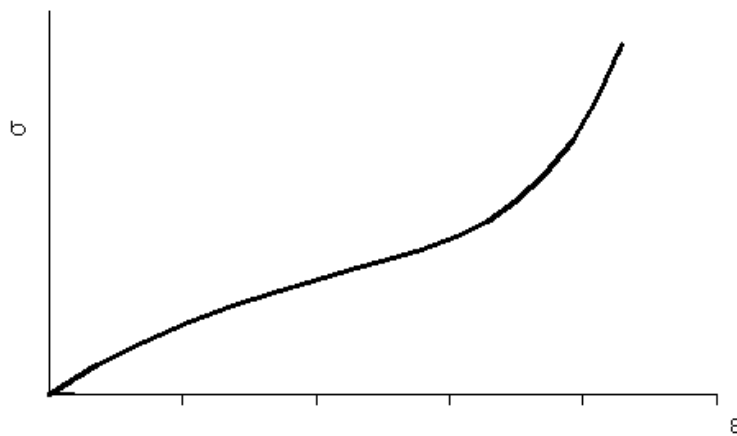
$$R_{\varepsilon} = \frac{A_r}{A_{\varepsilon}} \cdot 100 \quad (6)$$

Celková deformační práce, potřebná k protažení nebo přetržení tělesa odpovídá ploše tahové křivky, která vyjadřuje houževnatost materiálu (odpor proti přetržení) a je dána vztahem:

$$A_{\varepsilon} = \int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (7)$$

## 1.6 Hyperelastické chování elastomerů

Tato skupina materiálů se prezentuje zajímavou vlastností, a to že při zatížení malým napětím reagují velkou změnou tvarových rozměrů. Nedílnou součástí těchto materiálů je schopnost, hned po odlehčení, vrátit se nazpět do původního tvaru. Těleso tak nabude původních rozměrů. Pokud materiál disponuje těmito vlastnostmi, můžeme ho označit za hyperelastický. Na obrázku je znázorněn příklad takového materiálu v závislosti napětí na deformaci.[18]



Obr.č. 7.Průběh deformace elastomerního materiálu[29]

Hyperelastický materiál je definován následovně:

*Materiál považujeme za hyperelastický, existuje-li elastická potenciální funkce  $W$ , která je skalární funkcí některého z tenzorů přetvoření (deformace) a jejíž derivace podle některé složky přetvoření pak určuje odpovídající složku napětí.[35]*

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (8)$$

kde

$S_{ij}$  – jsou složky 2.Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí

$W$  – je funkce měrné energie napjatosti na jednotku nedeformovaného objemu

$E_{ij}$  – jsou složky Green-Lagrangeova tenzoru přetvoření

### 1.6.1 Konstitutivní popis hyperelastických materiálů

Jsou to vztahy popisující napětově deformační odezvu materiálů, které následně slouží při výpočtovém modelování. Jsou-li tyto materiály považovány za izotropní a nestlačitelné, můžeme je popsat konstitutivními modely. A to pomocí invariant pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace nebo pomocí funkce deformační energie vyjádřené v závislosti na hlavních protaženích.[19],[20],[21]

$$W = f(I_1, I_2, \{M\}) \quad \text{nebo} \quad W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \{M\}) \quad (9)$$

kde

$I_i$  - jsou invarianty Cauchy-Greenova tenzoru deformace,

$\{M\}$ - je množina materiálových parametrů,

$\lambda_i$  - jsou hlavní protažení.

Z funkce deformační energie  $W$ , která je funkcí protažení  $\lambda$  můžeme pro invarianty deformace  $I$  odvodit rovnici

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (10)$$

kde invarianty  $I_1$ ,  $I_2$ , a  $I_3$  jsou definovány pomocí hlavních protažení:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Pro izotropní materiál můžeme pomocí invariantů odvodit druhý Piola-Kirchhoffův  $S$  tenzor napětí ve tvaru:

$$S = 2 \frac{\partial W(C)}{\partial C} = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) I - \frac{\partial W}{\partial I_2} C + I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} C^{-1} \right] \quad (12)$$

kde  $C$  je Cauchyho tenzor deformace a  $I$  je jednotkový tenzor a druhý Piola-Kirchhoffův tenzor napětí  $S$  je definován:

$$S = J F^{-1} \sigma F^{-T} \quad (13)$$

Kde  $J$  je jakobián transformace (determinant matice složené z parciálních derivací prostorových souřadnic) a  $\sigma$  je Cauchyho tenzor napětí.

### 1.6.2 Konstitutivní modely popisující hyperelastické chování

Konstitutivní modely můžeme dělit z několika hledisek. Jedním z nich je dělení na modely fenomenologické a nefenomenologické. Fenomenologické modely neberou v úvahu fyzikální podstatu materiálu. Jedná se zejména o Mooney-Rivlin model. Zde se matematicky aplikují data pomocí exponenciálních funkcí nebo polynomů. Druhými jsou modely nefenomenologické, které uvažují i fyzikální strukturu a z toho plynoucí chování materiálu. Tyto modely byly navrženy na základě parametrů funkce deformační energie, které byly zjištěny experimentálními měřeními. Jedná se především o tlakové, tahové nebo smykové zkoušky. Modely jsou vhodné pro aplikaci s jiným rozsahem deformací s různou odchylkou od získaných experimentálních dat. Konstitutivní model by měl být schopen popsat celý esovitý průběh deformačního chování hyperplastického materiálu.[19],[20],[21]

#### *Model Neo-Hooke*

Hustota deformační energie je dána výrazem

$$W = \frac{G}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (14)$$

kde  $G$  je počáteční modul pružnosti ve smyku,  $\bar{I}_1$  je modifikace prvního invariantu pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace a  $d$  je parametr nestlačitelnosti.

Tento model se dá použít pro tahovou křivku do přetvoření kolem 50% při jednoosém tahovém namáhání. Linearita není příliš vysoká. Z toho plyne, že model není schopen popsat chování při větších přetvořeních. V tomto rozmezí ale poskytuje dobrou shodu s experimentálními daty.

#### *Model Mooney-Rivlin*

Tento fenomenologický konstitutivní model můžeme modifikovat ve více variantách. Kromě dvou parametrického modelu existují ještě tři, pěti a devíti parametrické modely.

#### Dvouparametrický model

$$W = c_{10} (\bar{I}_1 - 3) + c_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (15)$$

Při jednoosém namáhání lze tento model použít pro tahovou křivku do 100 % přetvoření. Není schopen popsat případnou inflexi deformačně napěťové křivky.

#### Tříparametrický model

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + c_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (16)$$

#### Pětiparametrický model

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

Tento model je schopen popsat inflexi deformačně napěťové křivky.

#### Devítiparametrický model

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + c_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + c_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + \\ + c_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 + c_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + c_{21}(\bar{I}_1 - 3)^2(\bar{I}_2 - 3) + \\ + c_{12}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3)^2 + c_{03}(\bar{I}_2 - 3)^3 + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (18)$$

Tento model je schopen popsat i složité tvary deformačně napěťové křivky.

### **Model Ogden**

Hustota deformační energie je dána výrazem

$$W = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{-\alpha_p} + \lambda_2^{-\alpha_p} + \lambda_3^{-\alpha_p} - 3) + \sum_{p=1}^N \frac{1}{d_p} (J - 1)^{2p} \quad (19)$$

Tento model je schopen popsat deformace velkého přetvoření. Řádově se jedná o přetvoření až kolem 700% při jednoosém namáhání. Nevýhodou je, že musí být velmi přesné zadání všech výchozích parametrů. V opačném případě model vykazuje velké odchylky.

***Polynomický model***

Hustota deformační energie je dána výrazem

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^M \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (20)$$

Tento model je zobecněním pro model Mooney-Rivlin. Pro  $N=1,2,3$  a  $M=1$  obdržíme jednotlivé parametrické Mooney-Rivlinovy modely.  $c_{ij}$  jsou konstanty, které popisují chování materiálu ve smyku.

***Yeoh model***

Hustota deformační energie je dána výrazem

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (21)$$

Tento model je vhodný pro materiály s nezanedbatelně měnícím se modulem pružnosti ve smyku. Ze začátku klesající tendence se vlivem velkých deformací mění na stoupající.

***Vargův model***

Hustota deformační energie je dána výrazem

$$W = \mu_V (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - 3) \quad (22)$$

kde  $\mu_V$  je modul pružnosti ve smyku,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  jsou hlavní protažení.

***Gent model***

Hustota deformační energie je dána výrazem

$$W = \frac{\mu \cdot J_m}{2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right)^{-1} \quad (23)$$

kde  $J_m$  je limitní hodnota výrazu  $I_1 - 3$ , v případě, že se blíží k nekonečnu, přechází na model Neo-Hooke.



## 1.7 Zkušební metody

Zkušební metody slouží ke stanovení fyzikálně mechanických charakteristik pryže. Principem je vystavit zkušební těleso vnějšímu působení síly. Ta může být tahová, tlaková ohybová aj. Zatížení může být závislé na čase. To znamená, že zatěžovací síla může působit dlouhodobě, krátkodobě nebo se může cyklicky opakovat. Výsledkem zkoušek jsou materiálové charakteristiky, které nám umožní popsat, jak se zkušební těleso (materiál, ze kterého je vyrobeno) chová při působení těchto zatěžovacích sil.[23],[24]

Zkušebních metod existuje celá řada pro popis nejrůznější materiálových konstant. Zde jsou popsány tři základní metody používané pro popis pryží:

1. Tahová zkouška
2. Tvrdost
3. Odrazová pružnost

### 1.7.1 Tahová zkouška

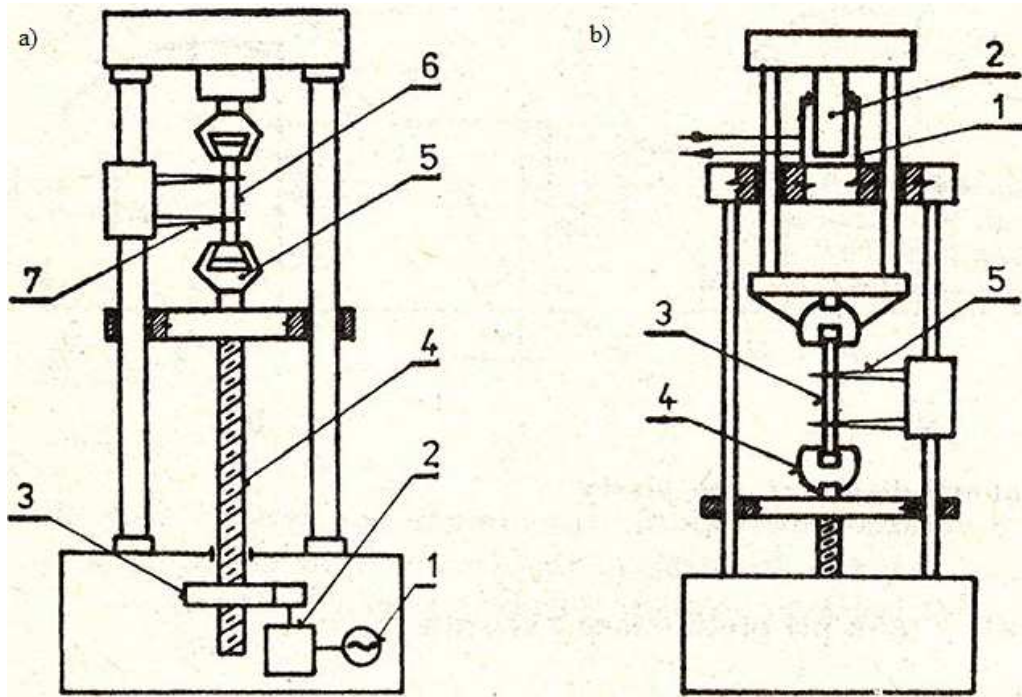
Tahová zkouška je zpravidla prováděna jednoosým zatěžováním materiálu, které způsobuje jeho deformaci. Zatěžování může probíhat i ve více osovém souřadném systému. Na těleso působí síla vyjádřena mechanickým napětím vztažené na jednotku plochy průřezu tělesa. Působí-li síla kolmo na průřez, mluvíme o normálovém napětí vyjádřeném vztahem

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (24)$$

Při zvyšování tohoto napětí budeme těleso podrobovat stále větším deformacím a bude docházet ke většímu prodloužení. To definujeme jako poměrné prodloužení tělesa

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

Prakticky se tahová zkouška provádí vložení vzorku ze zkoumaného materiálu, nejčastěji ve tvaru oboustranných lopatek, do trhacího zařízení. Vzorek se upne mezi dvě čelisti, kdy jedna je statická a druhá pohyblivá. Pohyblivá část se pohybuje konstantní rychlostí nezávislou na napětí. Tím dojde k protažení vzorku až do přetržení. U elastomerů se používá rychlost pohyblivé čelisti 1-500 mm.s<sup>-1</sup>. Zatěžovací sílu je možno volit v širokém rozsahu od 1N až po 10kN.[25]



*Obr.č. 8. Schéma mechanického a hydraulického univerzálního trhacího stroje[30]*

Popis obrázku č. 8:

- a) Mechanický univerzální trhací stroj: 1 – elektromotor, 2 – převodovka, 3 – ozubené kolo s maticí, 4 – pohybový šroub, 5 – upínací hlava, 6 – zkušební těleso, 7 – snímač prodloužení zkušebního tělesa,
- b) Hydraulický univerzální zkušební stroj: 1 – hydraulický válec, 2 – píst, 3 – zkušební těleso, 4 – upínací hlava, 5 – snímač prodloužení zkušebního tělesa.

Z tahové zkoušky získáme tyto základní charakteristiky:

1. *Pevnost v tahu při přetržení [MPa]*

– Tahové napětí zaznamenané při přetržení

2. *Tažnost [%]*

– Tahová deformace pracovní délky zkušebního tělesa při přetržení

### 3. Modul [MPa]

– Modul protažení. Označuje se M100, M200, M300 a M500. Je definován jako napětí na původní průřez vzorku, které je potřebné k protažení o určitou smluvní hodnotu.[25]

## 1.7.2 Zkouška tvrdosti

Tvrdost materiálů můžeme chápat jako odpor proti vniknutí jiného tělesa do své struktury. Principem těchto metod je vtlačování pravidelného tělesa do povrchu vzorku. Vtlačované těleso musí být vždy tvrdší než zkoušený vzorek. Nejčastější materiály zkušebních těles jsou ocel a diamant, které jsou zpracovány do určených tvarů. Ocel se používá pro vtlačovací kuličky nebo pro kužel. Z diamantu se vyrábí čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem min. 120°. Zkoušky tvrdosti můžeme rozčlenit na tři základní skupiny:

1. *Vnikací zkoušky* - jsou nejčastěji používané při zkoumání tvrdosti materiálů. Při těchto zkouškách dochází ke vtlačování velmi tvrdého tělesa (ve formě kuželu, jehlanu nebo kuličky) do zkušebního vzorku. K vyhodnocení tvrdosti slouží otisk vzniklý při vtlačení. Měří se například jeho hloubka, úhlopříčka nebo průměr. Jedná se o zkoušky podle Brinella, Vickerse, Rockwella, Shore.
2. *Vrypové zkoušky* – se provádějí přitlačení kuželovitého diamantového hrotu k povrchu zkušebního vzorku. Povrch vzorku musí být náležitě rozleštěný. Hrotem se pohybuje předepsanou rychlostí. Tvrdost je pak úměrná síle, která je potřebná ke vzniku vrypu o známé šířce. V praxi se používá zkouška podle Martense. Tyto zkoušky jsou vhodné k určování měkkých materiálů.
3. *Odrážové zkoušky* – ze známé výšky nad zkoumaným vzorkem se pustí závaží. Následně dochází k pružnému odrazení. Tvrdost určuje výška odskoku závaží od zkoumaného vzorku. K tomuto testování se nejvíce využívá zařízení zvané Shoreho skleroskop. Jedná se tedy o metodu zvanou Tvrdost dle Shoreho (Sh).

Hodnoty tvrdosti se uvádějí jako bezrozměrné číslo (tzn. bez jednotek) s udáním použité metody nebo použité stupnice. Výjimkou jsou metody založené na vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku. V tomto případě se používá jednotka MPa. Pro označení tvrdosti se používá značka H.

Vzhledem k vysoko elastickému chování pryže se nemohou používat metody pro měření tvrdých plastů nebo kovů, kdy dojde k plastické deformaci a měří se tak parametry vytvořeného otisku. Proto se používají metody, kdy se deformace odečítá již v průběhu vnikání zkušebního tělesa do vzorku. Nejčastěji používané metody pro měření pryže jsou tvrdost IRHD a Tvrdost Shore.[26]

### ***Tvrdost IRHD***

Zkratka z anglického výrazu International Rubber Hardness Degree, v překladu mezinárodní stupnice tvrdosti pryže. Jedná se o vlačování ocelové kuličky o známém průměru, který je závislá na tvrdosti pryže. Touto metodou je možné měřit tvrdost i na nerovných plochách. Tato tvrdost se nazývá zdánlivá. Rozsah stupnice je 10 – 100 IRHD. Pro měření pryží je stupnice téměř totožná se Shore A.

#### *Metody měření IRHD*

Metoda L – určena pro pryže nízké hodnoty tvrdosti 10 – 35 IRHD

Metoda N – normální zkouška, určena pro pryže o hodnotách tvrdosti 35 – 85 IRHD

Metoda H – určena pro pryže vykazující vysokou tvrdost, a to v rozsahu 85 – 100 IRHD

Metoda M – (tzv. metoda mikro) vhodná pro zkoušení malých nebo tenkých těles. Určená v rozsahu tvrdosti pryže 35 – 85 IRHD

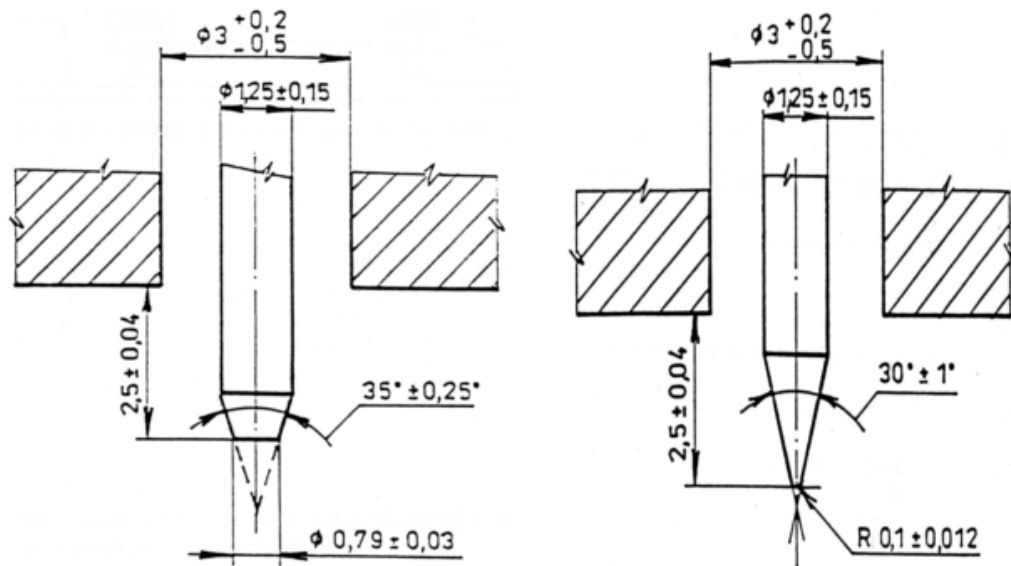
Metody určené k měření zdánlivé tvrdosti – jsou odvozeny od předešlých metod. Tyto metody se provádějí přímo na hotovém výrobku.

### ***Tvrdost Shore***

Spočívá ve vlačování specifikovaného hrotu do vzorku materiálu. Měří se hloubka vlačení, která je přímo úměrná hodnotě tvrdosti. Prakticky se zkouška provádí stlačením pružiny přítlačnou silou. Odpor pryže proti vniknutí hrotu pak způsobí jeho vsunutí do těla tvrdoměru. Mechanický převod zajišťuje ovládání ručičky na stupnici tvrdoměru.[26]

Pro měření pryží se používá tvrdoměrů Typu Shore A a Shore D. Typ A je vhodný pro měkčí pryže (rozsah 30 – 90 dílků Sh A), zatím co Typ D se používá pro pryže tvrdší (překročí-li rozsah 90 dílků Sh A). Pokud je hodnota nižší jak 30 Dílků Sh A, znamená to, že pryž je velmi měkká a je vhodné ji měřit metodou DVM.

Výhodou této metody je rychlost provedení zkoušky. Metoda je také velmi spolehlivá. Velkou nevýhodou měření tvrdosti pomocí tvrdoměru Shore A je, že se musí často kalibrovat jeho pružina, u které dochází k únavě vlivem času. Dále se musí vyměňovat i používané hroty, a to z důvodu jejich opotřebení.



Obr.č. 9. Zkušební hroty tvrdoměrů Shore A a Shore D [26]

### 1.7.3 Zkouška odrazové pružnosti

Metoda slouží ke stanovení schopnosti materiálu vracet mechanickou energii při deformaci rázem. Jedná se o jednoduchou metodu a rychlou metodu, která slouží pro kontrolu materiálů hlavně v gumárenském průmyslu. Měření je založeno na principu kyvadlového kladiva. Kladivo dopadne na zkoušený vzorek z předepsané výšky a následně se od něj odrazí. Poměru výšky odrazu k výšce kyvadla ve výchozí pozici se říká odrazová pružnost udávaná v %

$$R_S = \frac{h_r}{h_0} \cdot 100 \quad (26)$$

kde  $h_r$  – je výška odrazu

$h_0$  – je výška kladiva ve výchozí pozici

Odrazovou pružnost můžeme vyjádřit jako poměr energie vrácené k energii, která byla dodána při nárazu. Můžeme také říct, že odrazová pružnost je mírou elastických vlastností elastomerů.

Aby byl výsledek měření nezávislý, musí mít zkušební těleso určitou tloušťku. Protože při nárazu kyvadla vzniká v materiálu elastická vlna. Ta prostupuje jeho strukturou na druhou stranu vzorku, kde se odrazí a postupuje zpět. Je-li těleso příliš tenké, tak se vlivem interference ještě dodatečně ztrácí část energie odraženého kyvadla.

Základní přístroje na měření odrazové pružnosti jsou dvojího typu. Je to přístroj podle Schoba a přístroj podle Lüpkeho. Metoda podle Schoba je určena pro měření za normálních teplot. K energetickým ztrátám dochází hlavně v materiálu, ale i v ložisku přístroje. To je také důvod, proč jsou výsledné hodnoty naměřené tímto přístrojem nižší než u metody Lüpkovy. Tato metoda je vhodná nejen pro měření za normální laboratorní teploty, ale také pro jiné teploty (nižší nebo vyšší). Zkoušený vzorek se vytemperuje na požadovanou teplotu a pak se během jedné minuty provede vlastní měření ve zkušební komůrce, která je vytemperována na stejnou teplotu jako vzorek.[27]

## 1.8 Metoda konečných prvků

Jedná se o numerickou metodu, která slouží k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí na vytvořeném (třídímníonálním fyzikálním) modelu. Princip této metody spočívá v diskreditaci spojitého kontinua do konečného počtu prvků spojené uzly, ve kterých je pak zjišťována energie napjatosti vyvolána deformačními stavy. Celková energie napjatosti se dá určit z posuvů a napětí ve všech těchto uzlech. Metoda se využívá pro návrhy nových výrobků a konstrukcí pro stanovení a posouzení kritických míst na konstrukci.

MKP vychází z Lagrangeova principu (princip minima potenciální energie), podle kterého ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, kdy potenciální energie systému má minimální hodnotu. Pro systém v rovnováze je celková potenciální energie  $\Pi$  rovna součtu vnitřní deformační energie systému  $\Pi_i$  (napjatost tělesa) a práci vykonané vnějšími silami  $\Pi_z$  (potenciál vnějších sil)

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (27)$$

Pro třídímníonální těleso rozděleno na  $n$  počtu elementů je velikost celkové potenciální energie systému

$$\Pi = \sum_{e=1}^n \Pi^e - \{d\}^T \{f\} \quad (28)$$

kde  $\{d\}^T \{f\}$  je práce vykonané vnějšími silami a pro energetický funkcionál elementu lze psát

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_p^e \quad (29)$$

Energetický funkcionál lze vyjádřit v maticovém tvaru

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} [d]^e \left( \int_V [B]^T [D] [B] dV \right)^e \{d\}^e - \\ & - [d]^e \left( \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_\Gamma [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right)^e \end{aligned} \quad (30)$$

První a druhý integrál zde představují potenciální energii přetvoření. Třetí integrál představuje práci vykonanou objemovými silami. Čtvrtý integrál představuje práci vykonanou rovnoměrným zatížením na povrch oblasti  $\Gamma$ . Systém nabývá rovnováhy, je-li celková potenciální energie minimální. To znamená, že první variace energetického potenciálu bude ve tvaru

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (31)$$

kde

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \left( \frac{\partial \Pi^e}{\partial u_i} \delta u_i + \frac{\partial \Pi^e}{\partial v_i} \delta v_i + \frac{\partial \Pi^e}{\partial w_i} \delta w_i \right) = 0 \quad (32)$$

Matematickými úpravami předchozích rovnic lze vyjádřit tzv. *matice tuhosti elementu*

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (33)$$

kde

$[B]$  - transformační matice (a index T označuje transponovanou matici)

$[D]$  - matice fyzikálních konstant

Po další úpravě dostaneme základní tvar MKP maticové rovnice pro element

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (34)$$

kde

$\{d\}^e$  je vektor zobecněných posuvů

$${}^T [d]^e = [u_1, v_1, w_1 \dots \dots \dots u_r, v_r, w_r] \quad (35)$$

$\{f\}^e$  je vektor zatížení v uzlech s  $r$  počty uzlů na elementu

$${}^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \{f\}^2 \dots \dots \dots \{f\}^r] \quad (36)$$



Rovnice celého systému pro diskretizované těleso s  $m$  uzly musí zahrnovat rovnice všech uzlů a má tvar

$$[K]\{d\} = \{f\} \quad (37)$$

kde

$[k]$  - je matice tuhosti pro celý systém

$\{d\}$  - je vektor uzlových posunutí pro celý systém

$\{f\}$  - je vektor výsledných sil v uzlech

Výsledná rovnice pro výpočet tenzoru napětí v závislosti na posuvech a počátečních přetvořeních bez uvažování počátečních teplotních napětí se může zapsat jako

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (38)$$

Existují-li však počáteční napětí je nutné je superponovat.[31],[32]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo za pomoci zkušebních metod naměřit základní materiálové charakteristiky dvou kaučukových směsí, které slouží pro výrobu plných pryžových obručí pojezdových kol. Dále bylo nutno určit Mooney-Rivlinovy materiálové konstanty  $C_1$  a  $C_2$ , které byly použity pro výpočet stavu napjatosti a k popisu hyperplastického chování pryže. Pro výpočty byla použita metoda konečných prvků. K modelování pojezdového kola a k samotnému výpočtu byl využit software SAMCEF a SamcefField. Výsledky pro dva druhy směsí byly porovnány.

Při vypracování diplomové práce bylo postupováno dle následujících kroků:

- Seznámení se s problematikou pojezdových kol, popis procesu výroby, kontrola hotových výrobků.
- Teoretický popis suroviny pro výrobu pryžových obručí (kaučuku), popis chování elastických a hyperelastických materiálů.
- Popis základních zkušebních metod pro určení materiálových charakteristik.
- Úvod do MKP, matematický popis.
- Provedení experimentálního měření – tahová zkouška, stanovení tvrdosti a odrazové pružnosti.
- Stanovení materiálových parametrů a určení Mooney-Rivlinových konstant.
- Namodelování pojezdového kola za pomoci softwaru SAMCEF.
- Provést výpočet tenzoru napětí a deformace.
- Analyzovat hyperelastické chování pryžové obruče.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa se připravují do přesně určených tvarů a velikostí, které jsou definovány příslušnými normami ČSN, ISO, DIN aj. Zkušební tělesa se mohou připravovat přímo ze zkoušených materiálů, které se zpracovávají běžným způsobem (lisování, vstřikování, vulkanizace). Zkušební vzorek se vysekne. Druhým způsobem je příprava z hotových výrobků nebo polotovarů. Zkušební vzorek se vysekne nebo vyřeže, případně se použije jiný způsob obrábění.

Zkušební tělesa byla připravena ze dvou surových směsí, které poskytla firma *WICKE.cz*. Jedná se o směs 2500\_224 a 2500\_225. Tyto směsi se liší svými vlastnostmi.

*Tab.č. 2. Předepsané vlastnosti směsi 2500\_224*

<b>2500_224</b>		
	<b>Jednotka</b>	<b>Předpis</b>
<b>Hustota</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,12±0,02
<b>Tvrдость</b>	°Sh A	70+3;-2
<b>Pevnost v tahu při přetržení</b>	MPa	min.20
<b>Odrazová pružnost</b>	%	min.40

*Tab.č. 3. Předepsané vlastnosti směsi 2500\_225*

<b>2500_225</b>		
	<b>Jednotka</b>	<b>Předpis</b>
<b>Hustota</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,10±0,02
<b>Tvrдость</b>	°Sh A	60+3;-2
<b>Pevnost v tahu při přetržení</b>	MPa	min.15
<b>Odrazová pružnost</b>	%	min.60

Obě směsi slouží pro výrobu plných obručí. Příprava vzorků byla provedena ve výrobních prostorách firmy *WICKE.cz* a v laboratořích na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství na UTB ve Zlíně.

Surové směsi nasekané na desky byly nejdříve hněteny ve dvouválci. Následně byly zpracovány na kalandru. Z kalandru byla předpřipravená směs odvedena na menší dvouvá-

lec, kde se z nich připravily pásky o šířce 200 x 15 x 0,5 cm. Z pásků se připravila nálož do vulkanizační formy. Vulkanizace byla provedena na poloautomatickém hydraulickém lisu s horním a dolním ohřevem.

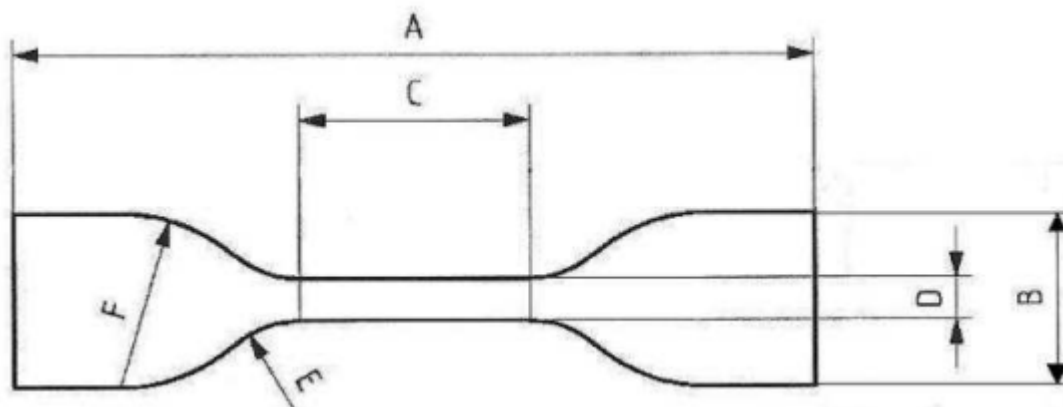
#### Postup vulkanizace

- 1) Ocelová forma se předehřála v lisu na pracovní teplotu.
- 2) Po vyhřátí se do ní vložil předem připravený obdélník vystřížený z vyrobených pásků o velikosti odpovídající formě a forma se vsunula do lisu.
- 3) Po vsunutí se lis uzavřel a spustil se odpočet času.
- 4) Po uplynutí vulkanizační doby se z lisu vyndala forma a po vychladnutí se z ní vyjmul vulkanizát. Byly odstraněny přetoky.
- 5) Celý postup se opakoval.

Tímto postupem byly připraveny pryžové desky o rozměrech 9,7 x 14,5 x 0,2 cm a 4,5 x 19,5 x 0,4 cm, ze kterých byly vyseknuty zkušební vzorky. Desky nevykazovaly žádné praskliny ani bubliny. Byly celistvé s hladkým povrchem.

#### ***Příprava zkušebních těles pro tahovou zkoušku***

Pro tahovou zkoušku byly připraveny zkušební vzorky ve tvaru oboustranných lopatek. Ty byly vyseknuty z připravených pryžových desek o tloušťce 2 mm vysekávacím nožem typu 1. Tvar zkušebních těles předepisuje norma pro stanovení tahových vlastností ČSN ISO 37. Pro zkoušku tahem byl zvolen tvar lopatek typu 1.

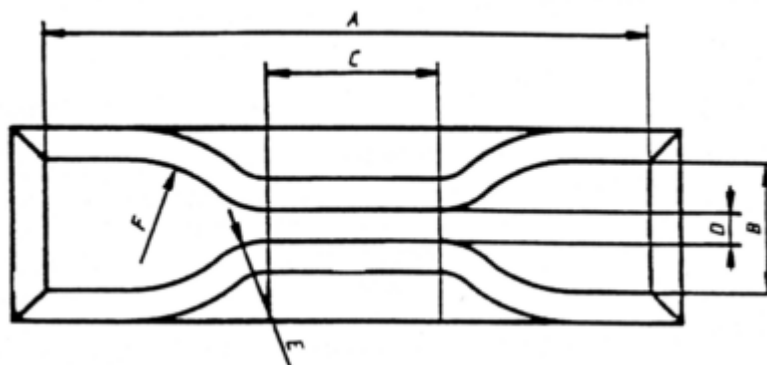


**Obr.č. 10.** Zkušební těleso ve tvaru oboustranné lopatky[25]

Rozměry zkušební tělesa typu 1:

A – celková délka	115	mm
B – šířka lopatek	$25,0 \pm 1$	mm
C – délka zúžené části	$33 \pm 2$	mm
D – šířka zúžené části	6,0	mm
E – vnější přechodový poloměr	$14 \pm 1$	mm
F – vnitřní přechodový poloměr	$25 \pm 2$	mm

Při vysekávání oboustranných lopatek dochází vlivem tlaku nože k deformacím a vznikají tak nerovné plochy na vzorku. Vzorky mají nepravidelný průřez a nedají se přesně změřit potřebné rozměry. Proto se používají vysekávací nože, které jsou normalizované. Je zde předpoklad, že zkušební vzorky převezmou tvar vysekávacího nože.



*Obr.č. 11. Vysekávací nůž pro zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek[25]*

*Tab.č. 4. Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa oboustranných lopatek[25]*

Rozměr	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
<b>A - celková délka</b>	<b>115</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>35</b>
<b>B - šířka lopatek</b>	$25,0 \pm 2,0$	$12,5 \pm 1,0$	$8,5 \pm 1,0$	$6,0 \pm 0,5$
<b>C - délka zúžené části</b>	$33,0 \pm 2,0$	$25,0 \pm 1,0$	$16,0 \pm 1,0$	$12,0 \pm 0,5$
<b>D - šířka zúžené části</b>	$6,0 \pm 0,4$	$4,0 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,1$
<b>E - vnější přechodový poloměr</b>	$14,0 \pm 1,0$	$8,0 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,1$
<b>F - vnitřní přechodový poloměr</b>	$25,0 \pm 2,0$	$12,5 \pm 1,0$	$10,0 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,1$

*Tab.č. 5. Délka pracovní části oboustranných lopatek[25]*

Zkušební těleso	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Délka pracovní části	25±0,5	20,0±0,5	10,0±0,5	10,0±0,5

### *Příprava zkušebních těles pro stanovení odrazové pružnosti*

Pro měření odrazové pružnosti byla vyseknuta kruhová tělesa o průměru 40 mm. Tloušťka byla 4 mm. Zkušební tělesa byla neporušená a měla hladký a rovný povrch. Pro měření odrazové pružnosti byl použit přístroj Schob.

### *Příprava zkušebních těles pro stanovení tvrdosti*

Pro měření tvrdosti byla použita metoda Shore A. Zkušební vzorky byly vyseknuty z předem připravených desek o tloušťce 4 mm ve tvaru čtverce o průměru 40 mm.

## **3.2 Tahová zkouška**

Tahová zkouška proběhla v laboratořích na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství na přístroji Ultra-High-precision Universal Testing Machines AG-X SHIMADZU za laboratorní teploty podle normy ČSN ISO 37. Trhací přístroj je určen ke zkoušení plastů a pryží.



*Obr.č. 12.. trhací stroj Ultra-High-precision Universal Testing Machines AG-X SHIMADZU[34]*

**Postup tahové zkoušky**

Pro obě směsi byly nachystány zkušební vzorky ve tvaru oboustranných lopatek. Celkem bylo připraveno 12 lopatek pro každou směs. U každé lopatky se 3x změřila tloušťka pracovní části, a to uprostřed pracovní části a na obou krajích. Šířka pracovní části je rovna řezným hranám vysekávacího nože a je 6 mm. Po změření všech potřebných hodnot byla lopatka uchycena mezi čelisti trhacího stroje tak, aby se zabránilo předeptnutí vzorku nebo šikmému uchycení. Nakonec se na trhacím zařízení nastavila zatěžovací síla na hodnotu 1000 N a rychlost posuvu čelisti, která byla  $100 \text{ mm/min}^{-1}$ . Trhací stroj byl propojen s PC, na kterém byl nainstalován software, ve kterém se nastavovaly potřebné parametry. Software dále zaznamenával všechny data během průběhu tahové zkoušky.

**3.2.1 Výsledky měření tahové zkoušky**

U zkušebních těles byly naměřeny grafické závislosti napětí na deformaci. Díky použitému softwaru jsme získali některé data jako pevnost v tahu při přetržení, tažnost, moduly M100 až M500, a další statistické výpočty.

**Tab.č. 6.** Výsledky tahové zkoušky směsi 2500\_225

směs 2500_225						
Vzorek	Pevnost v tahu při přetržení [Mpa]	Tažnost [%]	M100	M200	M300	M500
2	16,12	1067,64	1,37	2,44	3,68	6,10
4	15,32	1023,64	1,35	2,43	3,67	6,25
7	16,49	1021,77	1,50	2,71	4,09	6,77
8	15,80	1039,78	1,39	2,51	3,79	6,42
9	15,47	1004,04	1,48	2,63	3,95	6,58
11	16,49	1069,31	1,40	2,54	3,81	6,43
12	17,83	1130,11	1,45	2,57	3,86	6,45
<b>Aritmetický průměr</b>	16,22	1050,90	1,42	2,55	3,84	6,43
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,78	39,29	0,05	0,09	0,14	0,20



Vzorky 5 a 10 byly vyřazeny z výpočtů pro nízké hodnoty v porovnání s průměrnými hodnotami. U vzorků 1, 3 a 6 nedošlo k přetržení vlivem nevhodného nastavení extenzometru. Tyto vzorky byly použity při linearizaci tahových křivek, protože se pracuje pouze s jejich lineární oblastí a přetržení nemá na výsledek linearizace vliv. Grafické závislosti tahových křivek a jejich průběhy jsou uvedeny v příloze PI.

*Tab.č. 7. Výsledky tahové zkoušky směsi 2500\_224*

směs 2500 - 224						
Vzorek	Pevnost v tahu při přetržení [Mpa]	Tažnost [%]	M100	M200	M300	M500
1	23,84	1315,51	1,74	2,97	4,48	7,58
2	23,81	1282,30	1,73	2,96	4,37	7,58
3	23,49	1248,44	1,76	3,02	4,55	7,70
4	24,62	1302,31	1,71	2,94	4,45	7,56
5	23,88	1280,84	1,72	2,95	4,43	7,45
6	24,46	1335,51	1,72	2,91	4,38	7,36
7	24,80	1350,37	1,69	2,88	4,34	7,37
8	26,21	1360,04	1,80	3,07	4,60	7,63
9	23,90	1307,78	1,73	2,94	4,40	7,34
10	25,78	1347,51	1,79	3,05	4,58	7,65
11	24,56	1336,64	1,69	2,90	4,38	7,49
12	25,51	1339,18	1,77	3,02	4,56	7,75
<b>Aritmetický průměr</b>	24,57	1317,20	1,74	2,97	4,46	7,54
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,83	32,44	0,03	0,06	0,09	0,13

U všech vzorků došlo k přetržení v pracovní části. Oboustranné lopatky nejevily známky vad (např. bubliny) v místě přetržení. Grafické závislosti tahových křivek a jejich průběhy jsou uvedeny v příloze PII.

### 3.3 Linearizace tahových křivek

Pro získání materiálových Mooney-Rivlinových konstant  $C_1$  a  $C_2$  se musela provést linearizace tahových křivek s následným použitím lineární regrese. Pomocí těchto konstant můžeme vypočítat modul pružnosti v tahu a modul pružnosti ve smyku. Můžeme tedy charakterizovat chování pryžového materiálu při deformaci.[18]

Při popisu tohoto chování vycházíme ze dvouparametrické Mooney-Rivlinovy rovnice, která popisuje funkci deformační energie

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (39)$$

kde  $I_1$ ,  $I_2$  jsou invarianty deformace, pro které platí

$$I_1 = \lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_z^2 \quad (40)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{\lambda_y^2} + \frac{1}{\lambda_z^2}$$

$I_3$  je pro jednoosí tah roven jedné. Pro zatížení v ose x platí

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{1}{\lambda_x^{1/2}} \quad (41)$$

$$\lambda_x = 1 + \varepsilon_x$$

Invarianty se dosadí do Mooney-Rivlinovy rovnice a matematickými úpravami dostaneme

$$W = C_1 \cdot \left( \lambda_x^2 + \frac{2}{\lambda_x} - 3 \right) + C_2 \cdot \left( \frac{1}{\lambda_x^2} + 2\lambda_x - 3 \right) \quad (42)$$

Derivací a následnou úpravou rovnice

$$W = \frac{1}{2} \mu_{MR} (I_1 - 3) + f(I_2 - 3) \quad (43)$$

kde  $\mu_{MR} = 2C_1$  a vyjadřuje smykový modul a  $f$  je nespecifikovaná funkce druhého invariantu pravého Cauchyho tenzoru deformace, pro kterou platí  $f(0) = 0$

pak získáme

$$\frac{F}{A_0} = C_1(\alpha - \alpha^{-2}) + C_2(1 - \alpha^{-3}) \quad (44)$$

kteřá bývá označována jako Mooney-rivlinova rovnice a je schopna dobře popsat tahové křivky až po inflexní bod. Z experimentálních údajů se pak vyhodnotí  $C_1$  a  $C_2$ . Data jsou zpracována v linearizovaném tvaru

$$\frac{F}{2A_0(\alpha - \alpha^{-2})} = C_1 + C_2 \frac{1}{\alpha} \quad (45)$$

Youngův modul pružnosti v tahu  $E$  je dán ze směrnice závislosti napětí na protažení při nulovém protažení. Mezi  $E$  a  $C_1$  a  $C_2$  plyne vztah

$$E = \left[ \frac{d(F/A_0)}{d\alpha} \right]_{\alpha=1} = 6C_1 + 6C_2 \quad (46)$$

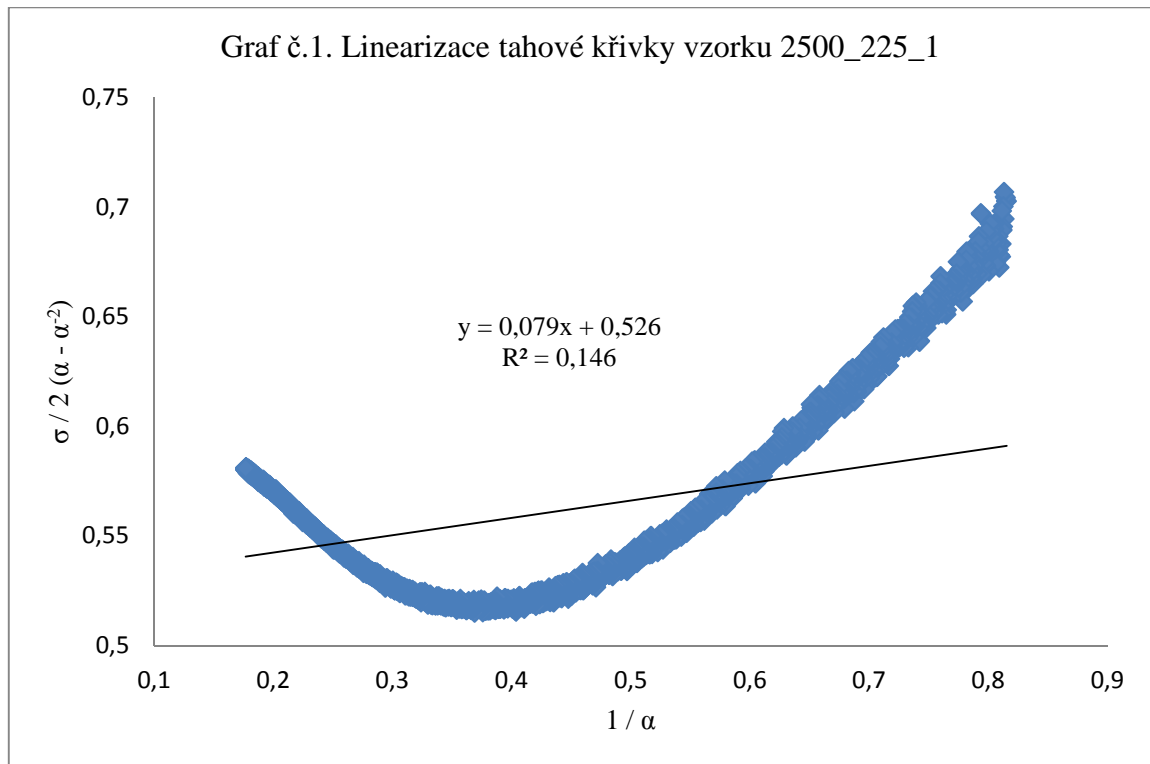
Modul pružnosti ve smyku  $G$  je trojnásobně menší než modul pružnosti v tahu  $E$

$$E = 3G \quad (47)$$

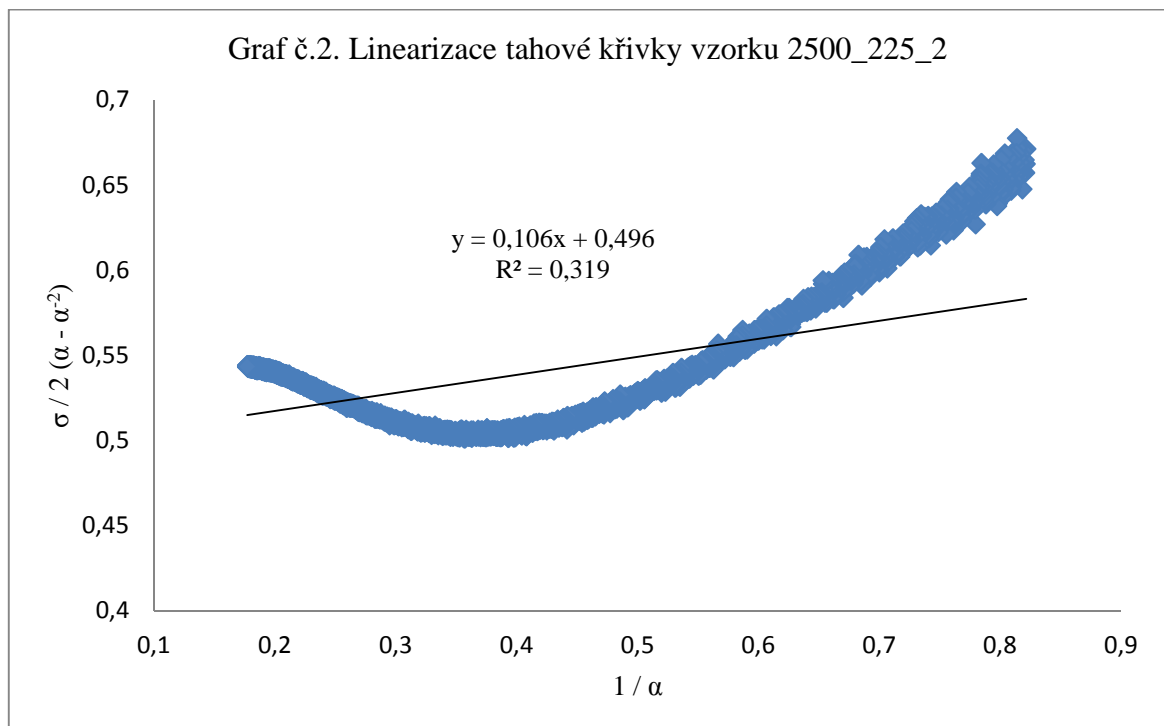
### ***Postup linearizace tahových křivek***

Z tahové zkoušky byly naměřené datové záznamy tahových křivek převedeny do Microsoft Excel. Provedla se linearizace podle výše uvedeného postupu. Vzhledem k tomu, že tahové křivky zaznamenávají závislost napětí na deformaci, byly na osu x vyneseny hodnoty  $1/\alpha$  a na osu y byly vyneseny hodnoty  $\sigma/2(\alpha - \alpha^{-2})$ . Pomocí lineární regrese jsme získali rovnici přímky. Kdy směrnici dané přímky odpovídá hodnota  $C_2$ . Konstantě  $C_1$  pak odpovídá úsek na ose y.

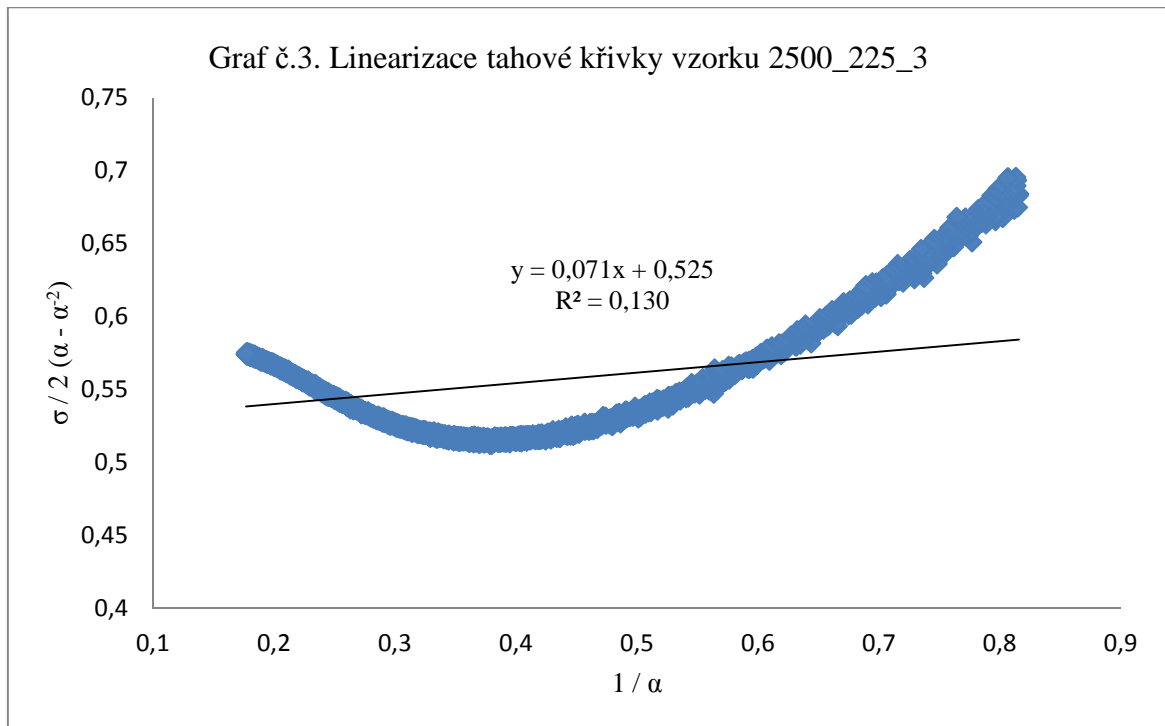
### 3.3.1 Linearizace tahových křivek ze směsi 2500\_225



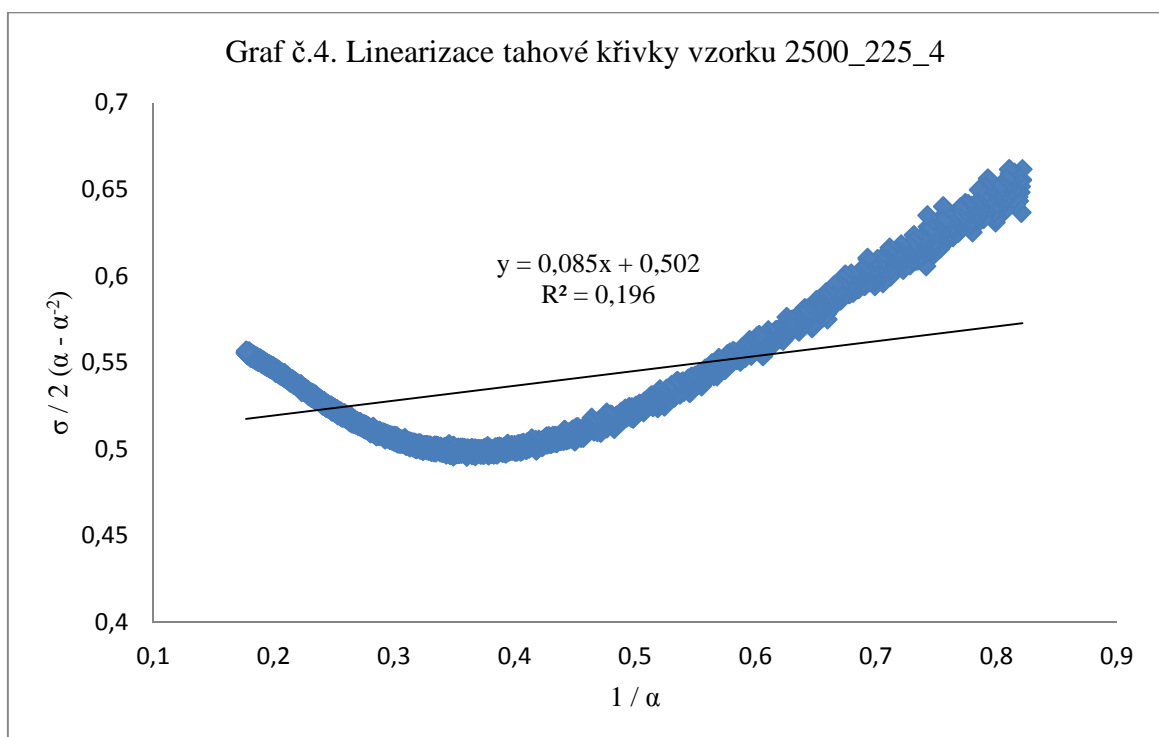
*Graf č.1.Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_225\_1*



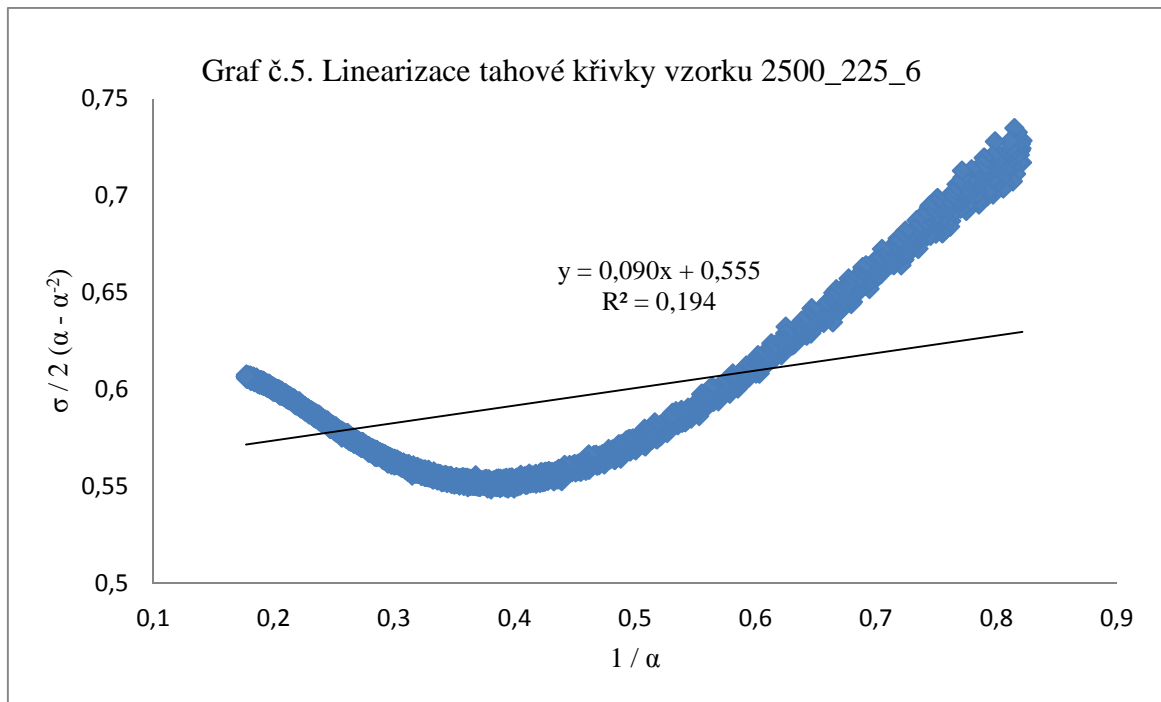
*Graf č.2.Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_225\_2*



*Graf č.3. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_225\_3*



*Graf č.4. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_225\_4*



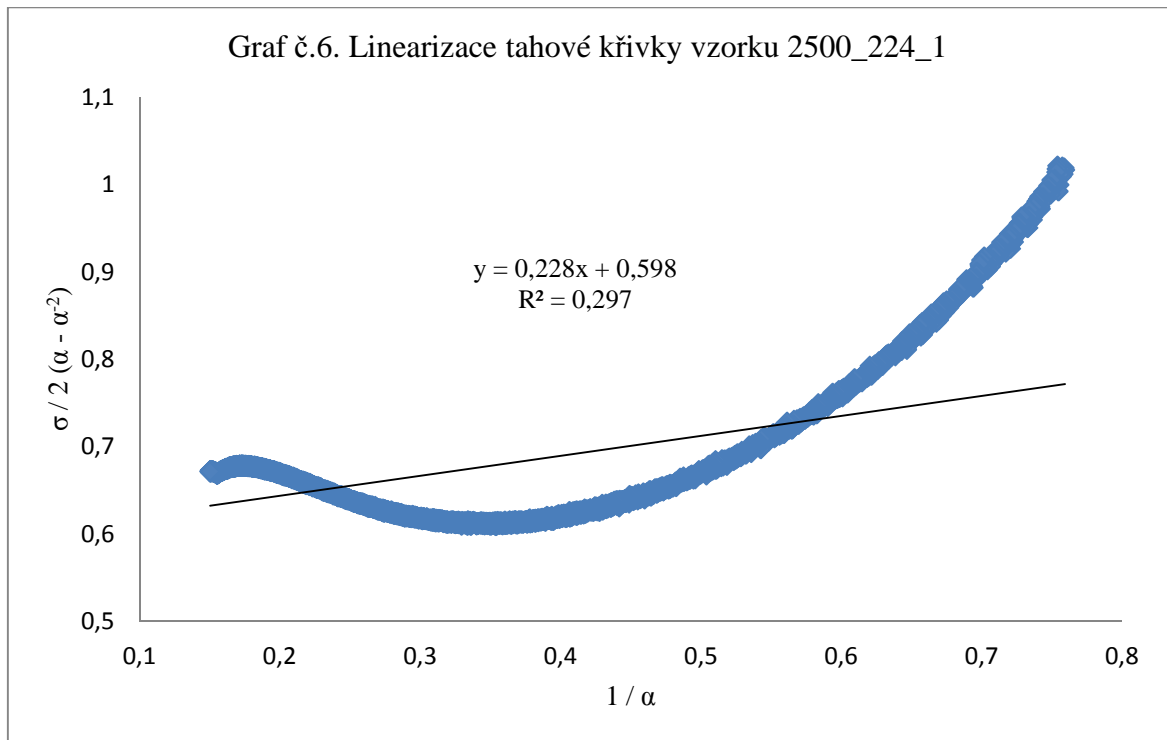
*Graf č.5. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_225\_5*

*Tab.č. 8. Materiálové konstanty směsi 2500\_225*

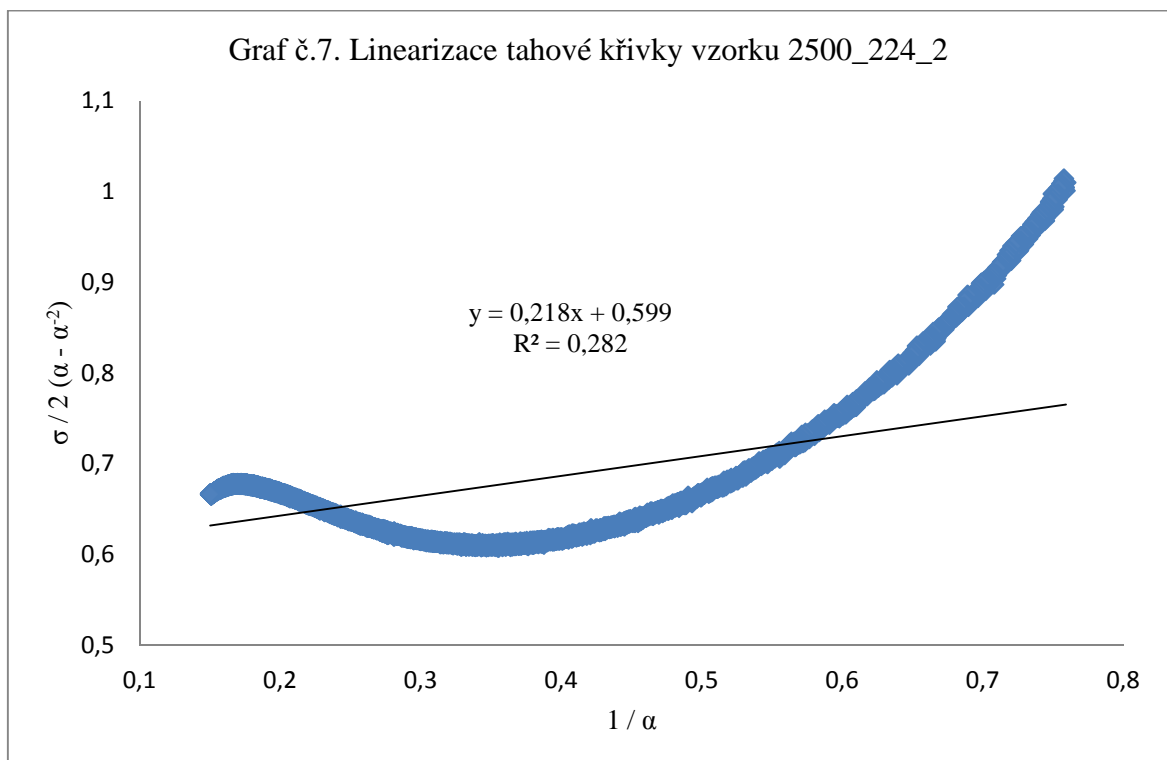
směs 2500_225		
vzorek	C1	C2
1	0,526	0,079
2	0,496	0,106
3	0,525	0,071
4	0,502	0,085
6	0,555	0,09
7	0,546	0,136
8	0,515	0,111
9	0,53	0,132
10	0,517	0,146
11	0,514	0,117
12	0,509	0,158
<b>průměr</b>	0,52136364	0,1119091
<b>sm.odch.</b>	0,017699	0,0287974
<b>E(MPa)</b>	3,799636364	
<b>G(MPa)</b>	1,266545455	

Linearizace tahových křivek vzorků 7,8,9,10,11,12 je uvedena v příloze PIII.

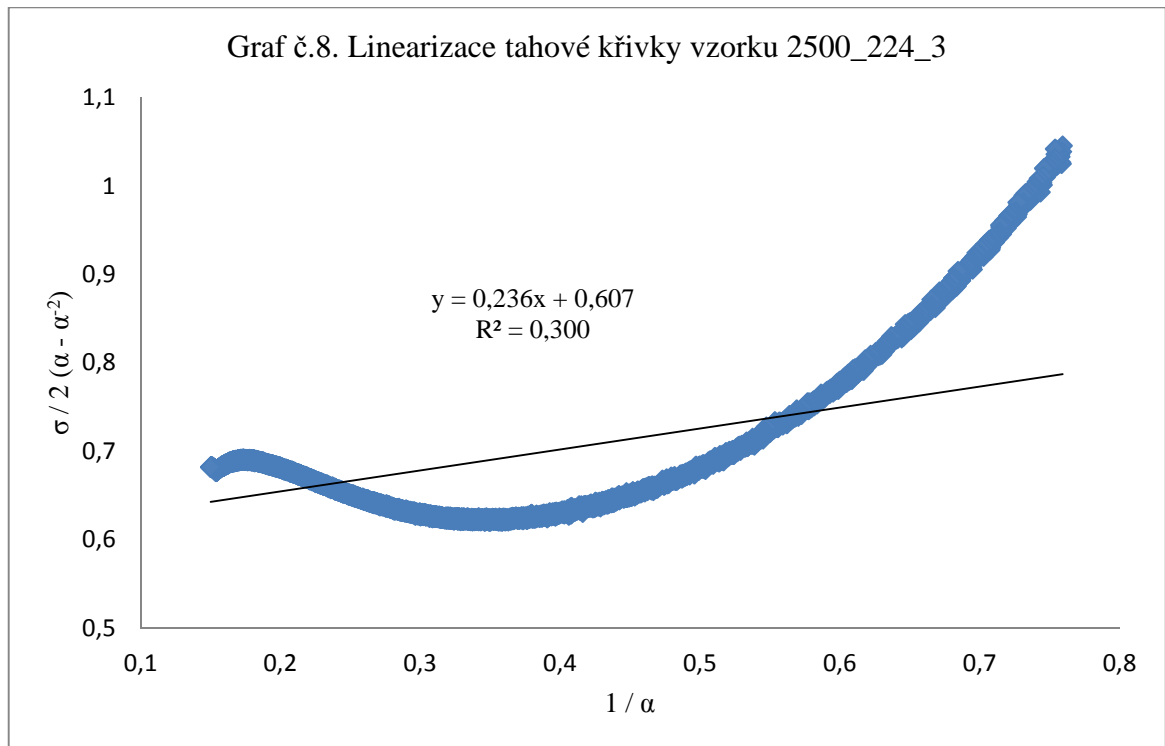
### 3.3.2 Linearizace tahových křivek ze směsi 2500\_224



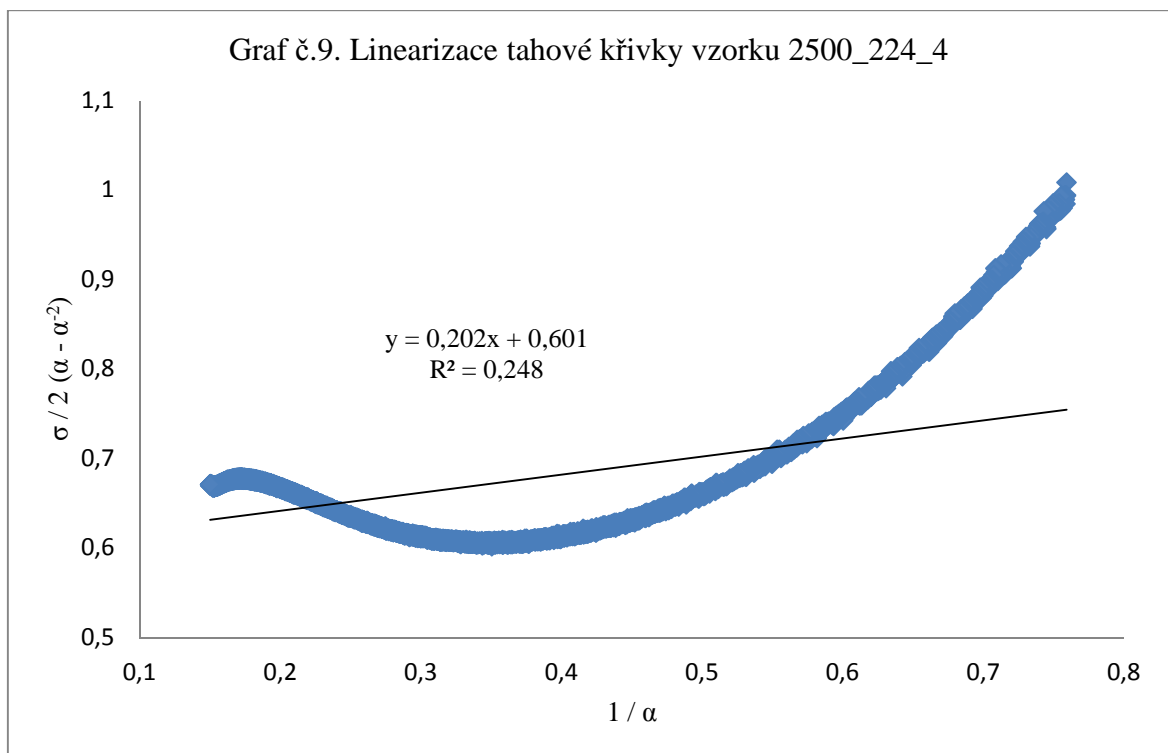
*Graf č.6. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_224\_1*



*Graf č.7. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_224\_2*

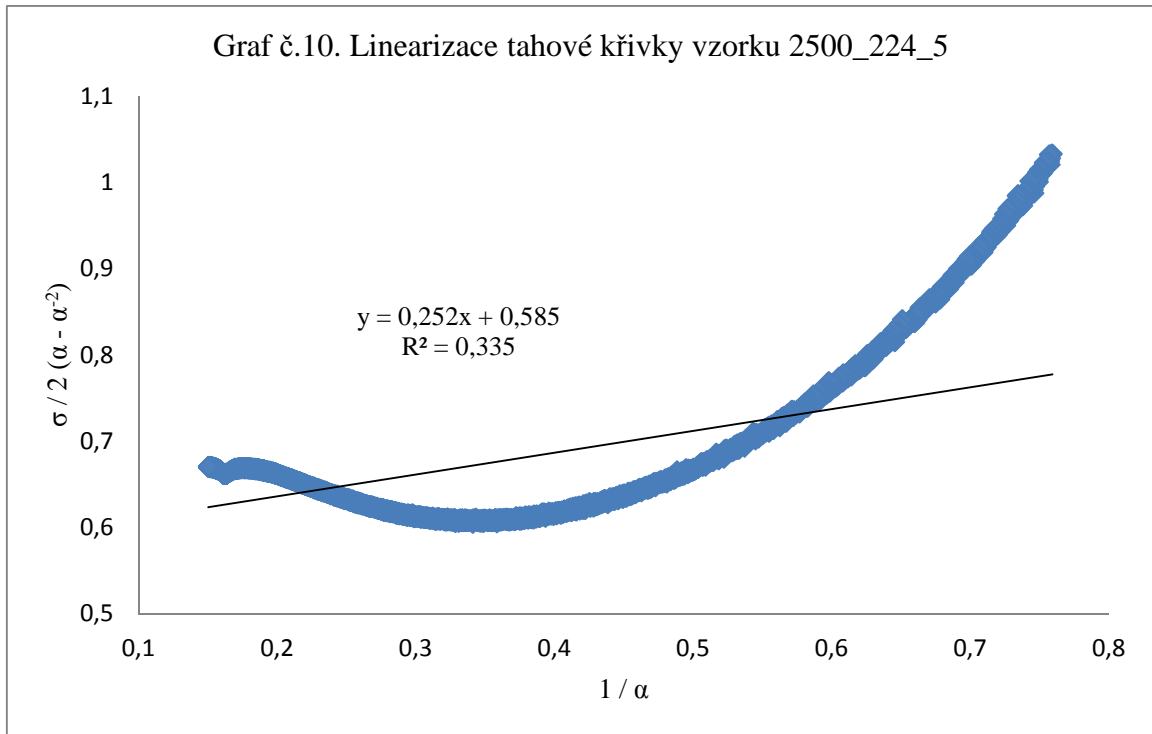


*Graf č.8. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_224\_3*



*Graf č.9. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_224\_4*





*Graf č.10. Linearizace tahové křivky vzorku 2500\_224\_5*

*Tab.č. 9. Materiálové konstanty směsi 2500\_224*

směs 2500_224		
vzorek	C1	C2
1	0,598	0,228
2	0,599	0,218
3	0,607	0,236
4	0,601	0,202
5	0,252	0,585
6	0,575	0,262
7	0,575	0,245
8	0,603	0,271
9	0,571	0,283
10	0,605	0,252
11	0,594	0,197
12	0,615	0,211
<b>průměr</b>	0,56625	0,2658333
<b>sm.odch.</b>	0,099943734	0,104123
<b>E(MPa)</b>	4,9925	
<b>G(MPa)</b>	1,664166667	

Linearizace tahových křivek vzorků 6,7,8,9,10,11,12 je uvedena v příloze PIV.

### 3.4 Stanovení odrazové pružnosti

Stanovení odrazové pružnosti probíhalo v laboratořích na Ústavu inženýrství polymerů. Způsob měření ukládá norma ČSN 62 1480. Měření se provádělo na zařízení Schob za laboratorní teploty.

Zkušební tělesa měla tloušťku 12 mm. Byla složena ze tří tenčích těles o tloušťce 4 mm. Měření se provedlo na třech zkušebních vzorcích pro oba typy směsí. Vzorek se připevnil ke kovadině (na její přední část). Nejprve proběhla tzv. mechanická kondicionace, jak ukládá norma (tři nárazy kladiva). Následně se provedlo vlastní měření 3x na každém vzorku. Na stupnici se odečetly hodnoty odrazové pružnosti v procentech.

*Tab.č. 10. Naměřené hodnoty odrazové pružnosti pro směs 2500\_225*

<b>Odrazová pružnost směsi 2500_225[%]</b>			
<b>Měření č.</b>	<b>1.vzorek</b>	<b>2.vzorek</b>	<b>3.vzorek</b>
<b>1</b>	61,0	60,2	60,0
<b>2</b>	60,0	62,0	60,4
<b>3</b>	60,8	61,5	61,0
<b>Medián</b>	60,8	61,5	60,4
<b>Aritmetický průměr</b>	60,6	61,2	60,5

*Tab.č. 11. Naměřené hodnoty odrazové pružnosti pro směs 2500\_224*

<b>Odrazová pružnost směsi 2500_224[%]</b>			
<b>Měření č.</b>	<b>1.vzorek</b>	<b>2.vzorek</b>	<b>3.vzorek</b>
<b>1</b>	40,5	40,0	40,0
<b>2</b>	39,8	40,0	40,2
<b>3</b>	40,0	40,2	40,6
<b>Medián</b>	40,0	40,0	40,2
<b>Aritmetický průměr</b>	40,1	40,1	40,3

### 3.5 Stanovení tvrdosti

Pro stanovení tvrdosti pryže existuje několik metod. Pro naše měření byla vybrána metoda Shore. Tato metoda spočívá v měření odporu daného materiálu proti vniknutí tvrdšího tělesa. Abychom zjistili, ve kterém rozsahu hodnot se pohybuje tvrdost vzorků, byl proveden slepý pokus. Pro naše měření byl zvolen typ přístroje Shore A.

Měření probíhalo v laboratořích na Ústavu inženýrství polymerů za laboratorní teploty. Postupovalo se podle normy ČSN EN ISO 868. Byly použity vzorky čtvercového tvaru s délkou hrany 40 mm o tloušťce 4 mm. Zkušební těleso bylo vloženo pod hrot tvrdoměru pod úhlem 90°. Vzdálenost zkušebních míst od sebe byla 6 mm. Vzdálenost zkušebního hrotu od vzorku musela být vždy nejméně 9 mm. Přítlačná síla byla volena tak, aby opěrná patka tvrdoměru pevně dosedla na povrch zkušebního vzorku. Po třech vteřinách od počátku působení přítlačné síly se odečetla tvrdost. V případě, že se hodnota tvrdosti po třech vteřinách ještě měnila, byla odečtena znovu po 15 vteřinách. Norma ukládá 5 po sobě jdoucích měření tvrdosti pro každý vzorek. Následně se stanovuje aritmetický průměr ze všech měření tvrdosti.

Výsledné hodnoty tvrdosti jsou jen orientačního charakteru a nejsou směrodatné k určování konkrétního kaučuku.

*Tab.č. 12. Naměřené hodnoty tvrdosti*

<b>Tvrdost [°Sh A]</b>		
<b>číslo měření</b>	<b>2500_225</b>	<b>2500_224</b>
<b>1</b>	61,2	69,8
<b>2</b>	61,0	70,1
<b>3</b>	60,0	71,0
<b>4</b>	61,0	69,8
<b>5</b>	61,0	70,2
<b>Aritmetický průměr</b>	60,8	70,2
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,4	0,4

### 3.6 Modelování pojezdového kola a výpočet napjatosti pomocí MKP

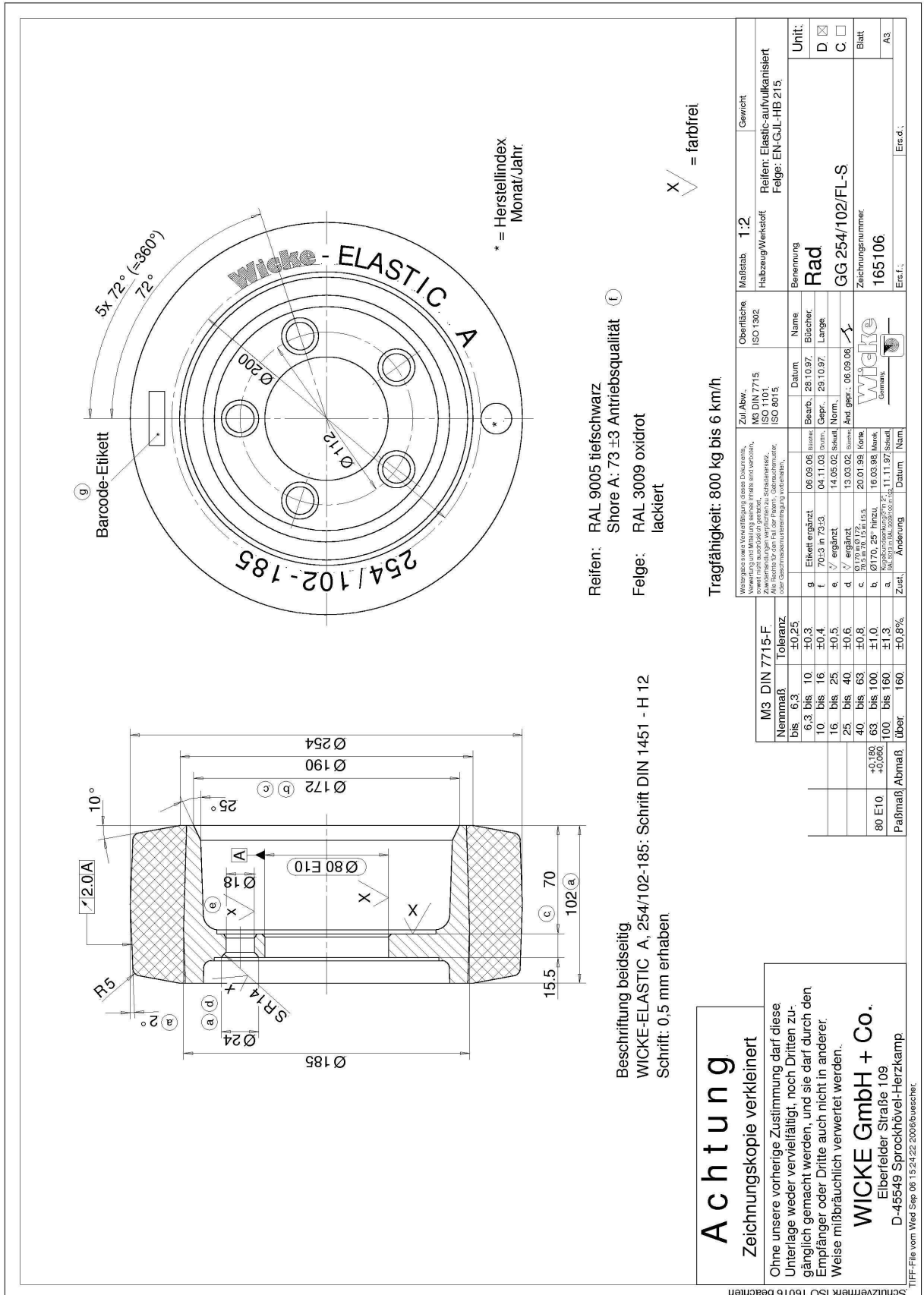
V této části je popsán postup modelování a pevnostní výpočet pojezdového kola. K tomuto účelu byly použity Mooney-Rivlinovi materiálové konstanty, které charakterizují chování pryže. Konstanty byly použity pro výpočet deformace pryžové obruče v softwaru SAMCEF a SamcefField. Je zde popsán postup modelování pojezdového kola, stanovení okrajových podmínek, zátěžových stavů a vyhodnocení výsledků.

Při výpočtu byla použita metoda konečných prvků. Podstatou metody je nahrazení spojitého kontinua kontínuem diskretním modelem kontinua. To znamená, že se těleso rozdělí do konečného počtu elementů, které jsou spojeny v uzlech. Charakter diskretního modelu struktury zachovává spojitost v uzlových bodech.

Program SAMCEF pro výpočty metodou konečných prvků obsahuje 3-D modelář. V preprocessingu bylo provedeno modelování struktury, vygenerování sítě konečných prvků, definování okrajové podmínky, zátěžové stavy, materiál. V procesoru proběhl výpočet. Simulace výsledků výpočtu (tenzor napětí, tenzor deformace, simulace deformačního chování) byla provedena v grafickém postprocesoru.

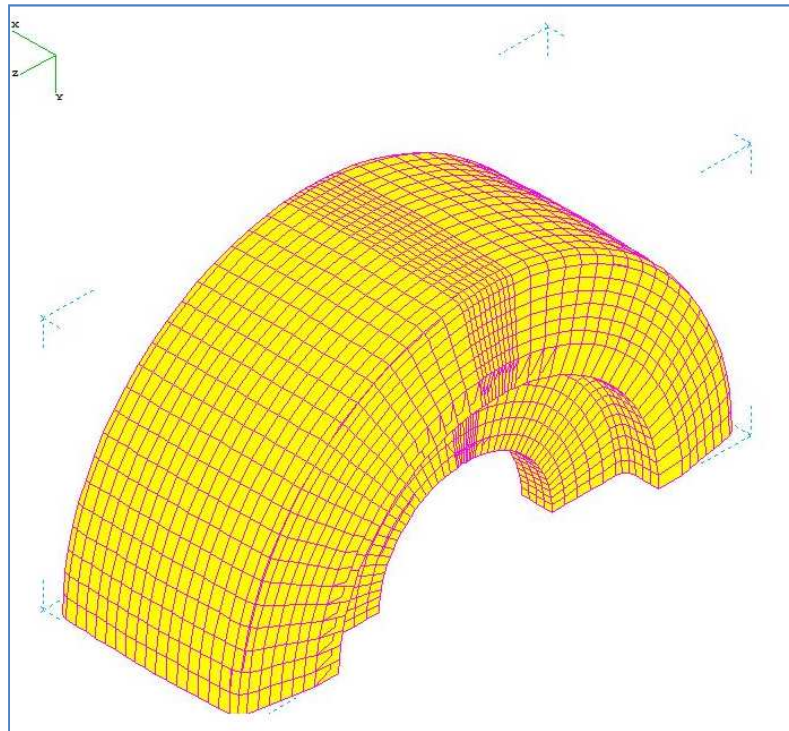
#### 3.6.1 Modelování pojezdového kola

K modelování bylo vybráno pojezdové kolo s označením C33. Veškeré rozměry byly odečteny z technického výkresu, který poskytla firma *WICKE.cz*. Jelikož se jedná o rotačně symetrickou úlohu, byla namodelována pouze polovina pojezdového kola.



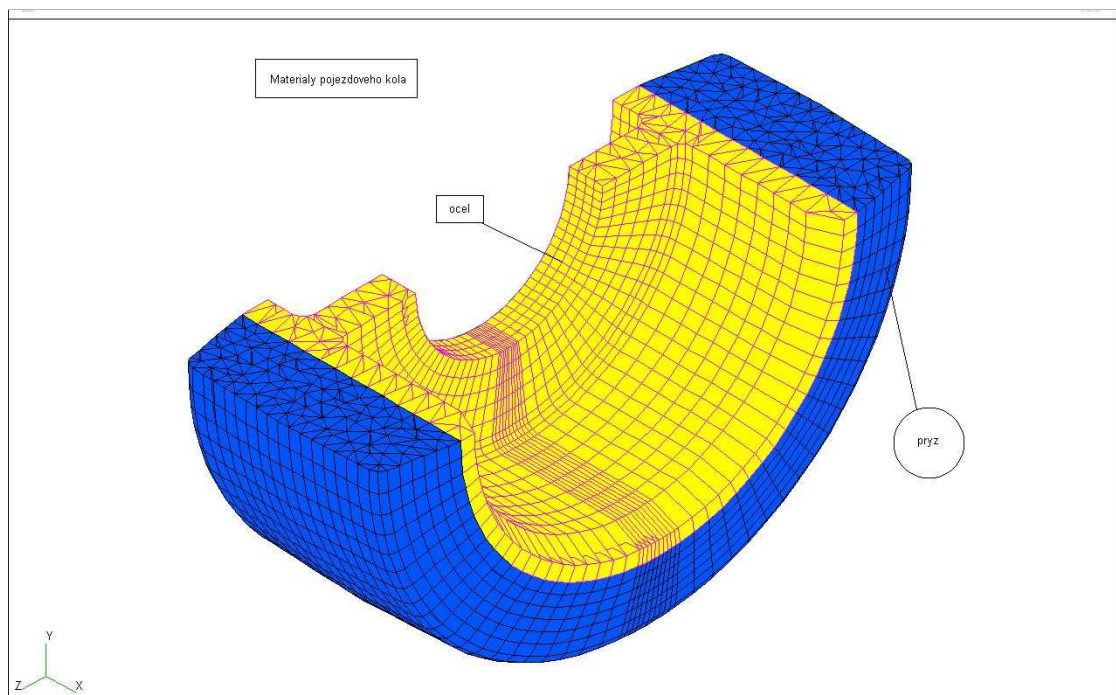
Obr.č. 13. Technický výkres pojzdového kola

Na základě technického výkresu byla namodelována polovina pojezdového kola s konečným počtem prvků.



**Obr.č. 14.** Model pojezdového kola s konečným počtem prvků

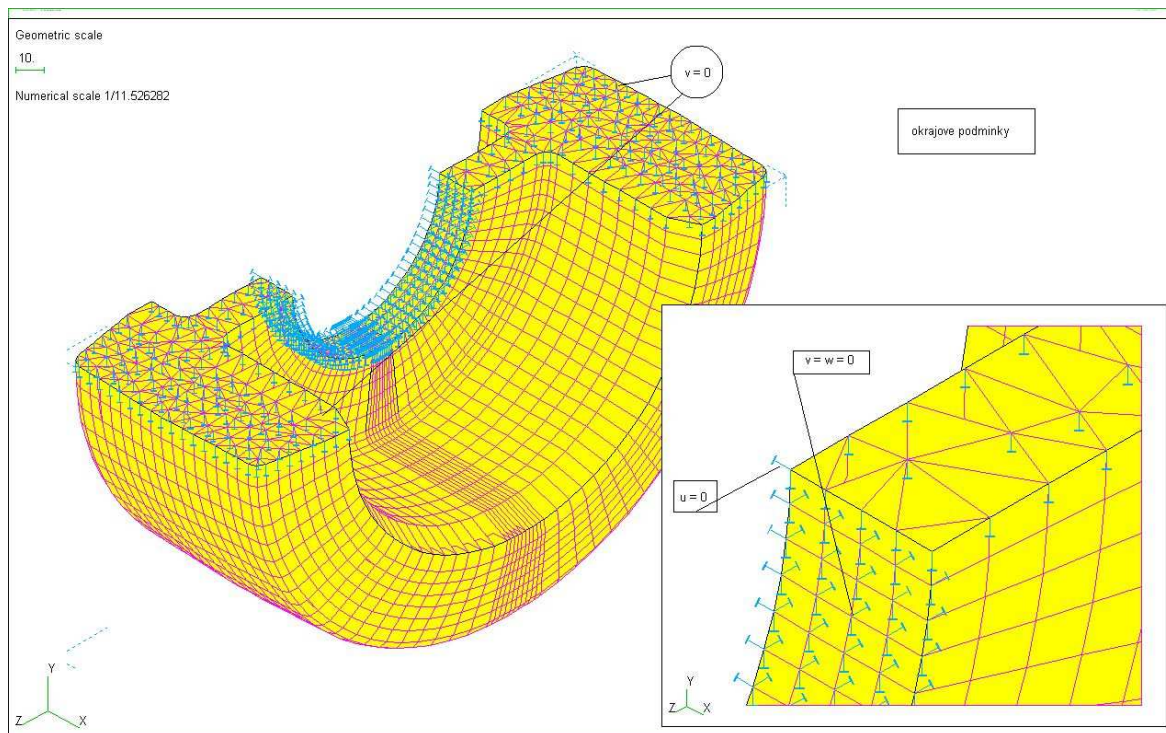
Konečnoprvkový model se skládá ze dvou typů materiálů. Prvním je ocel. Ta tvoří ráfek (disk) kola. Druhým materiálem je pryž, která vytváří plnou pryžovou obruč.



**Obr.č. 15.** Průřez kola – konečné prvky pro ocel a pro pryž

### Okrajové podmínky a zátěžové stavy

Okrajové podmínky slouží k uchycení tělesa v prostoru. Musí se zadat tak, aby odpovídaly reálnému uchycení tělesa při exploataci v provozních podmínkách. Vzhledem k symetrii úlohy byly okrajové podmínky uvažovány tak, jak je znázorněné na obr.č. 16.



**Obr.č. 16.** Okrajové podmínky

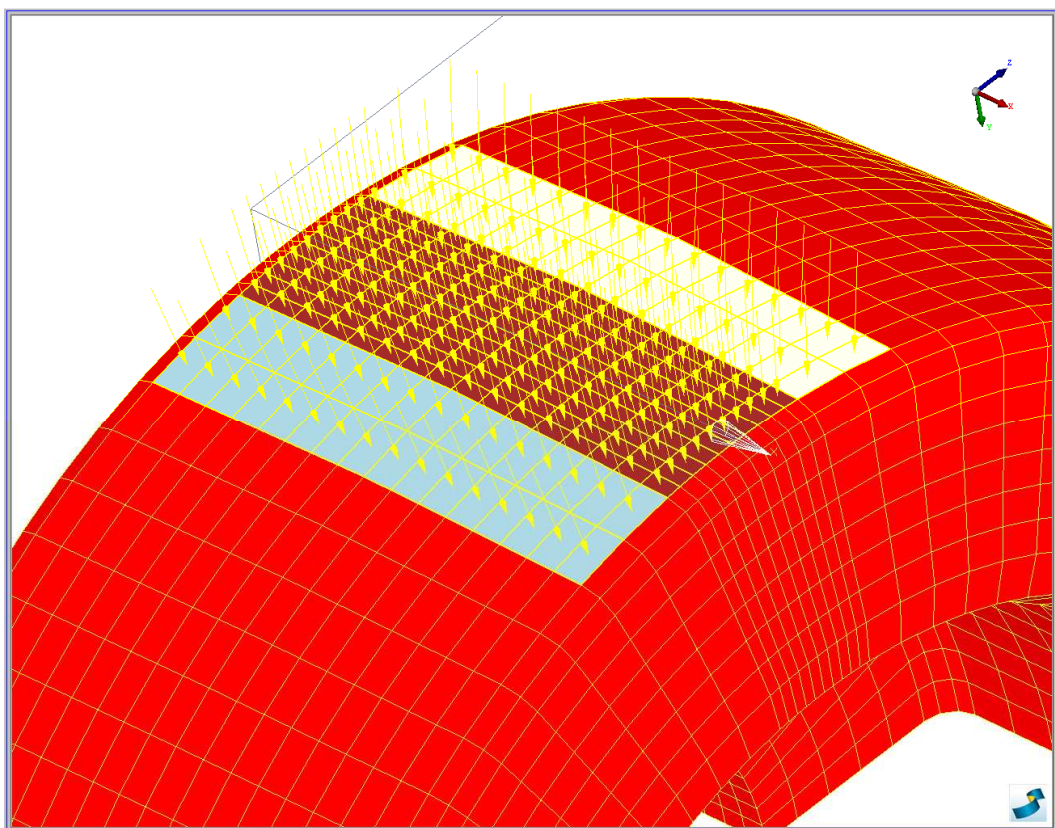
Dalším krokem je nadefinování zátěžových stavů. Jedná se o uvažovaný stav, při kterém jsou na těleso aplikovány okolní zatěžující síly. Na pojezdové kolo působí tlaková síla vyvolaná hmotností pojezdového zařízení s nákladem. Z toho důvodu byla určena kontaktní plocha, na kterou působí zatěžovací síly.

Určení kontaktní plochy proběhlo experimentálně. Pojezdové kolo se natřelo kontrastním barvivem a zatížilo se břemenem o hmotnosti 650 kg a 750 kg. Na vzniklých otiscích se odečetle velikost kontaktní plochy. Aproximativní velikost kontaktní plochy byla namodelována na modelu kola.

Pojezdové kolo má předepsanou nosnost 800 kg. Vzhledem k velikosti vytvořené kontaktní plochy na modelu obruče byla zátěžová síla uvažována jako rovnoměrně rozložený tlak o velikosti  $p = 1,6 \text{ MPa}$ .

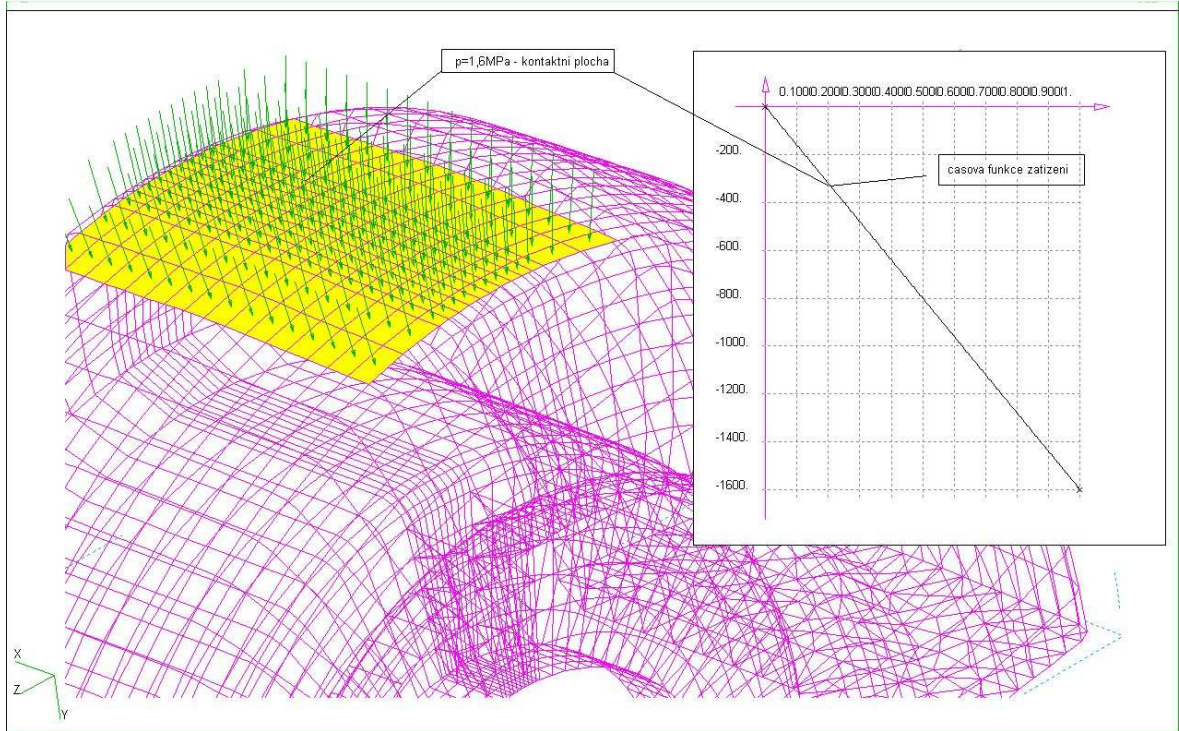


Obr.č. 17. Otisk kontaktní plochy



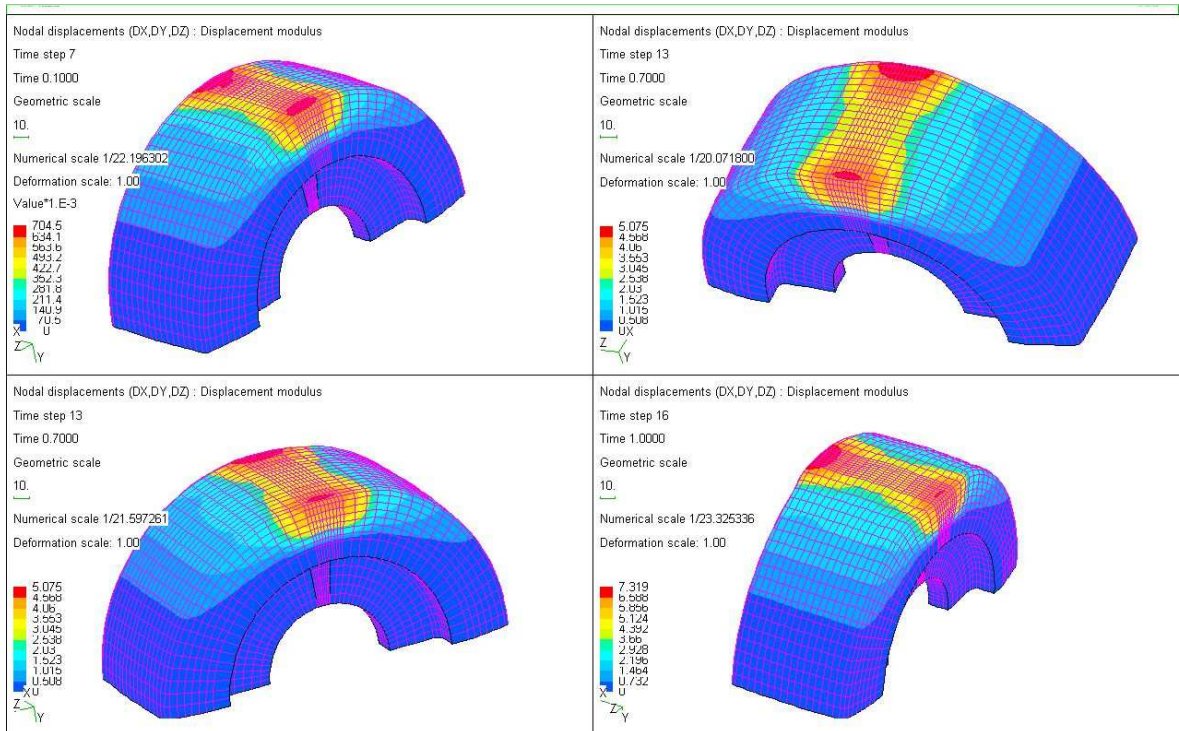
Obr.č. 18. Zatížení tlakem  $p=1,6\text{MPa}$  v kontaktní stopě



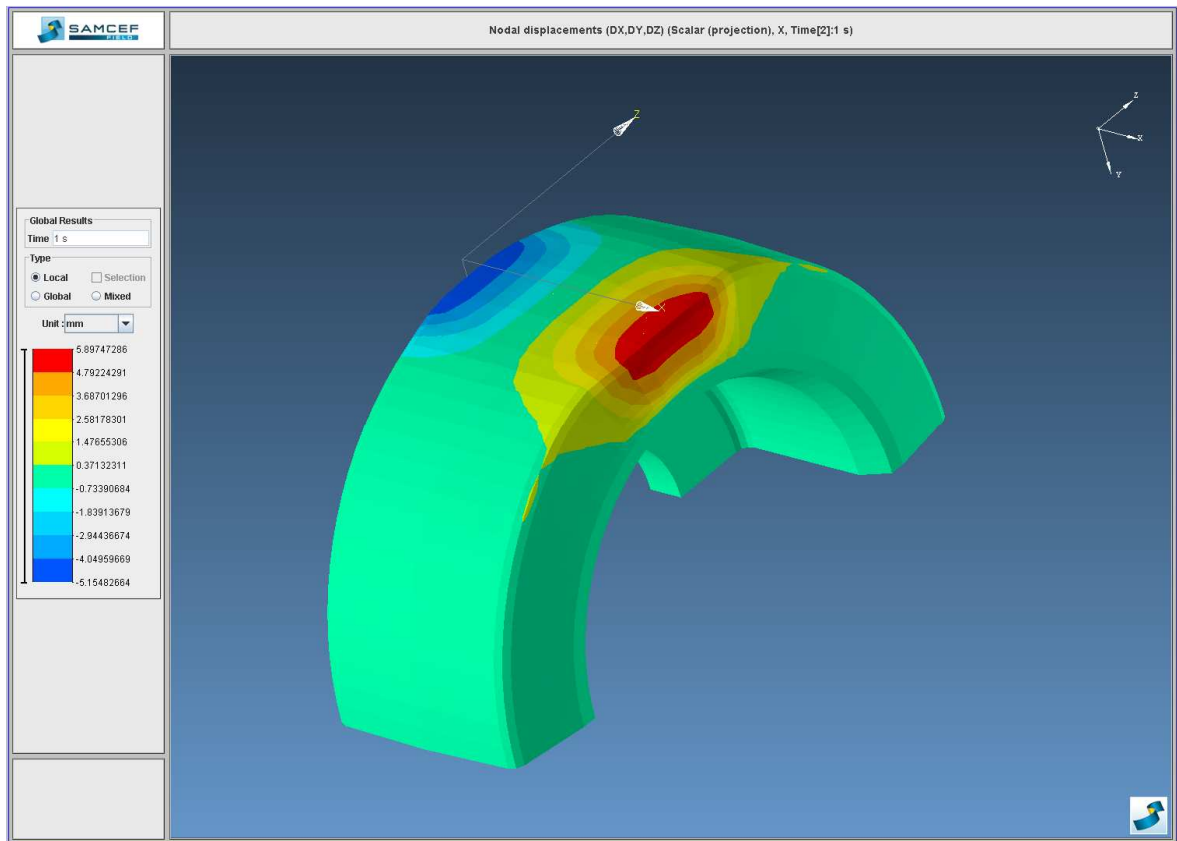


Obr.č. 19. Časová funkce zatížení pro tlak  $p=1,6\text{MPa}$  v kontaktní stopě

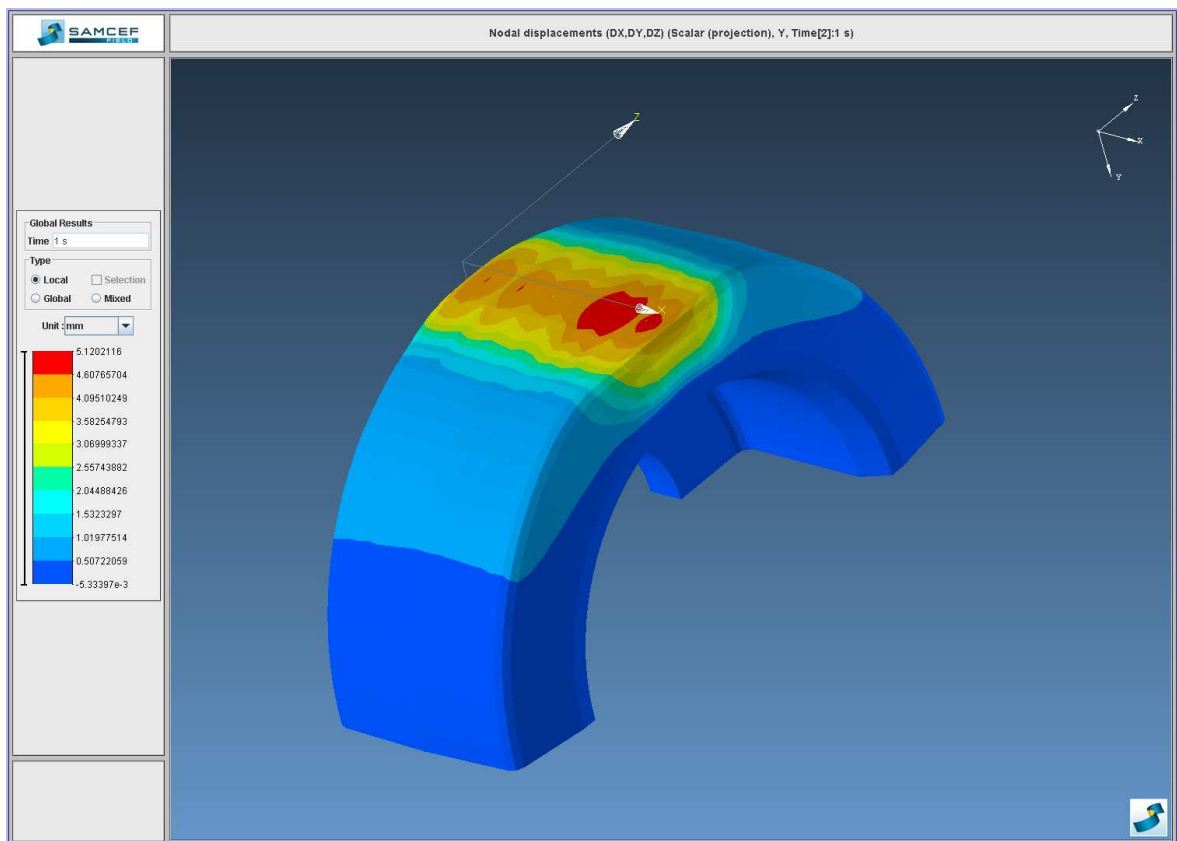
### 3.6.2 Deformace a napětí pro pojezdové kolo s obručí z tvrdší směsi



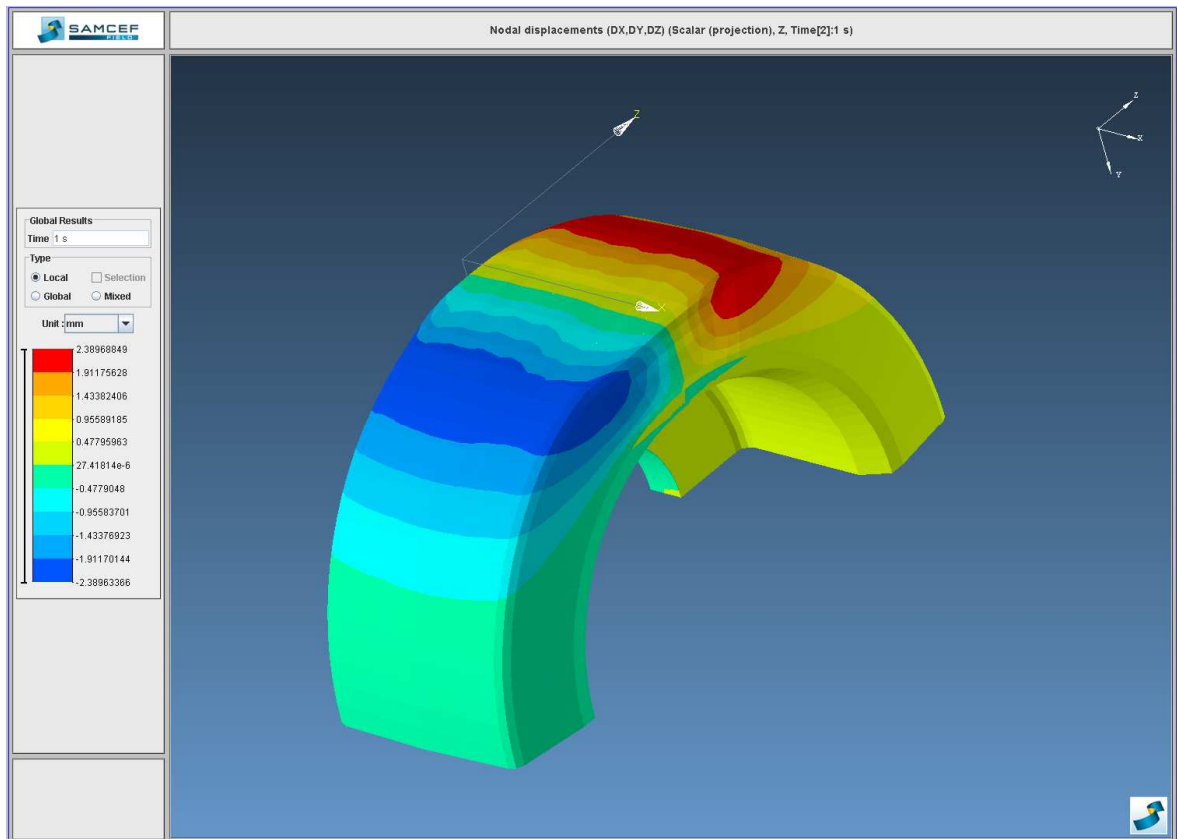
Obr.č. 20. Velikost celkové deformace – konvergence



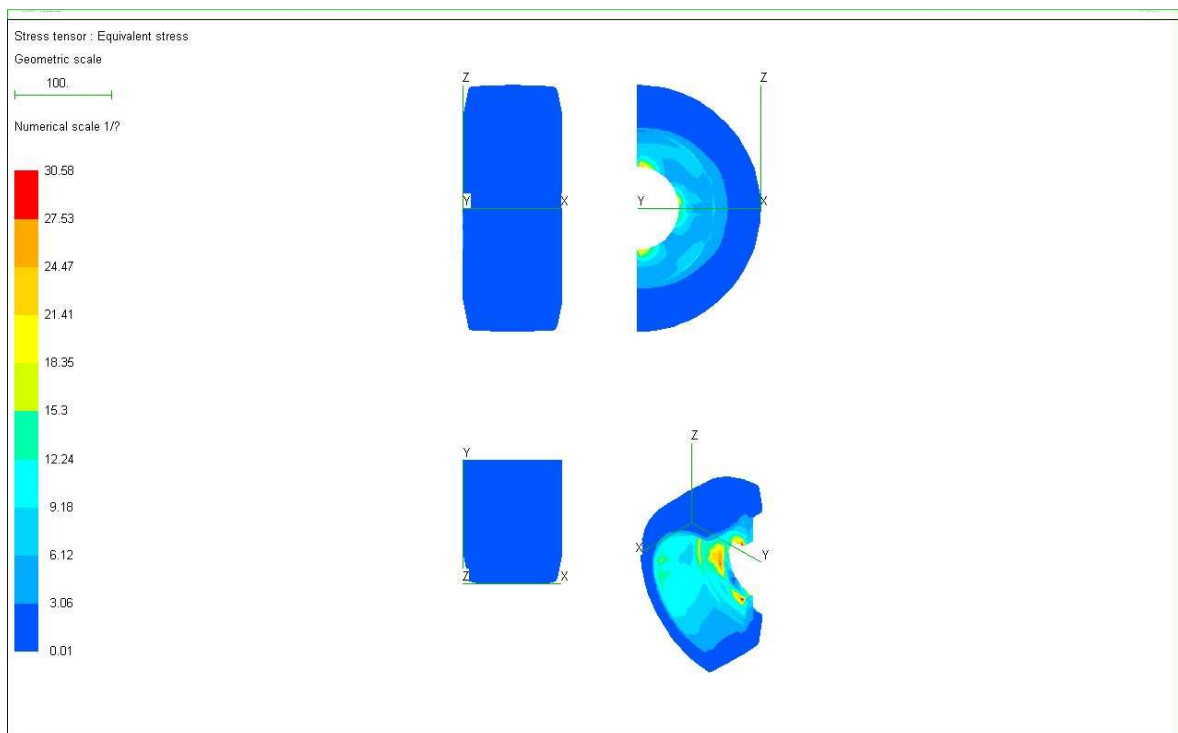
Obr.č. 21. Deformace v ose x



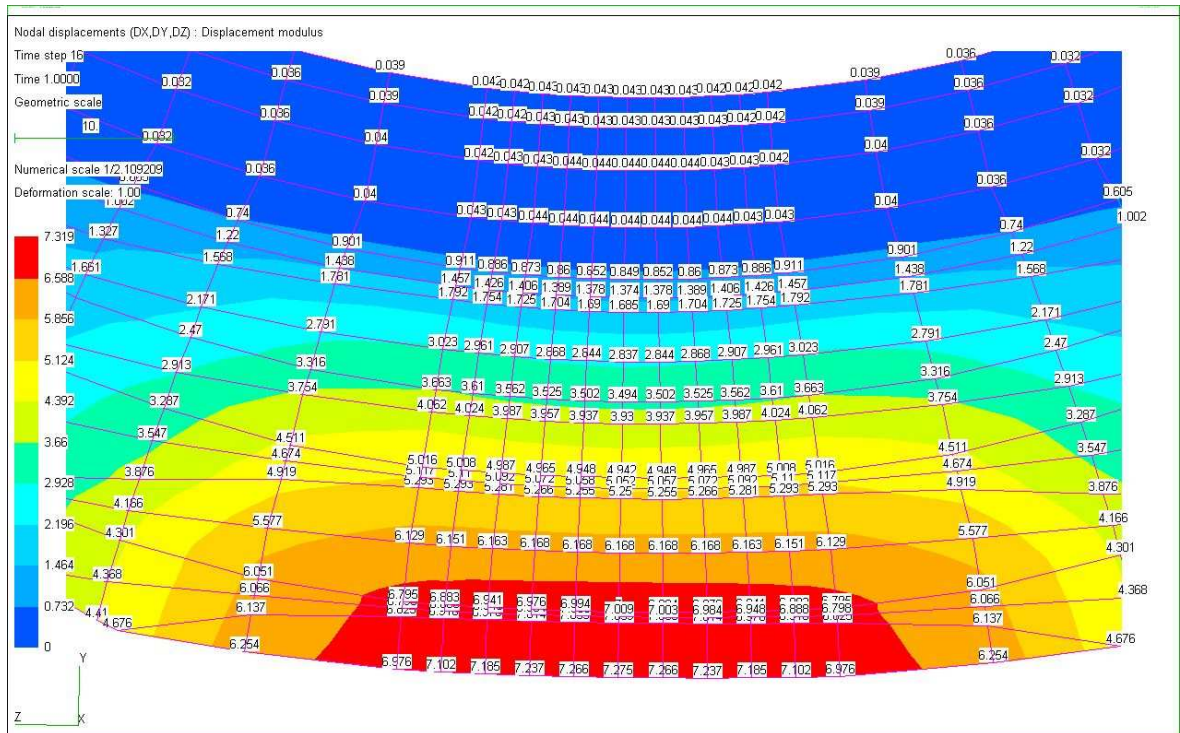
Obr.č. 22. Deformace v ose y



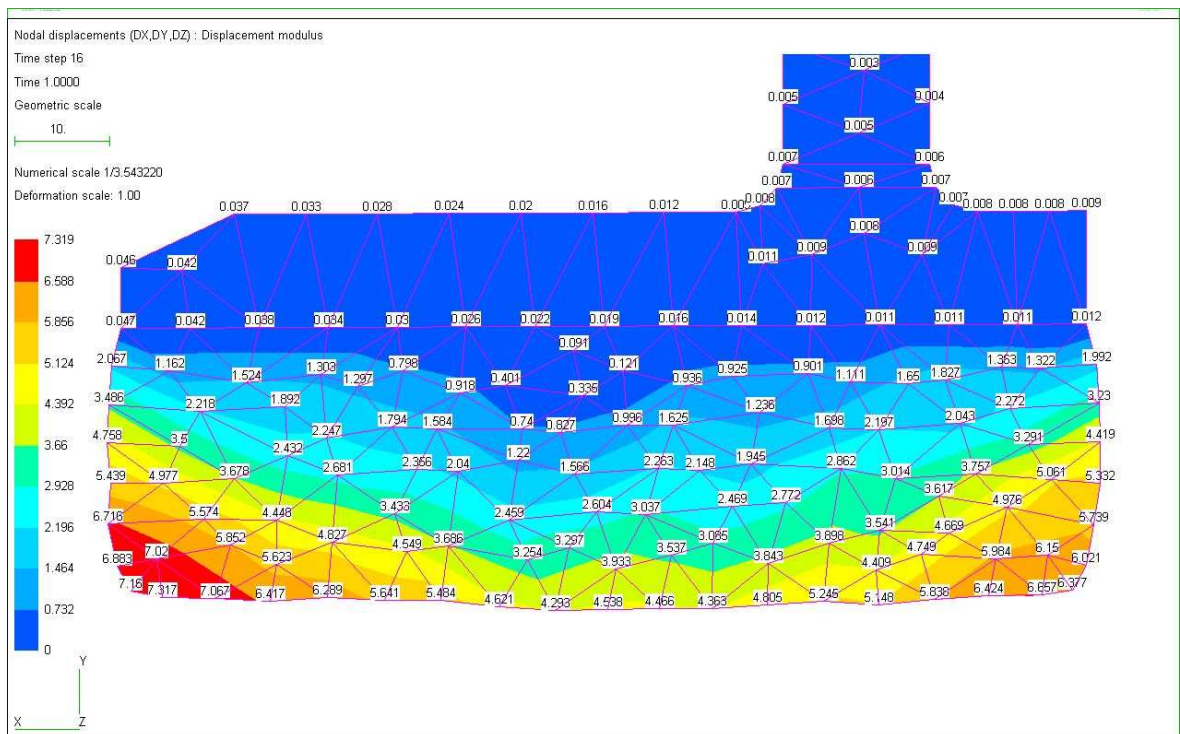
Obr.č. 23. Deformace v ose z



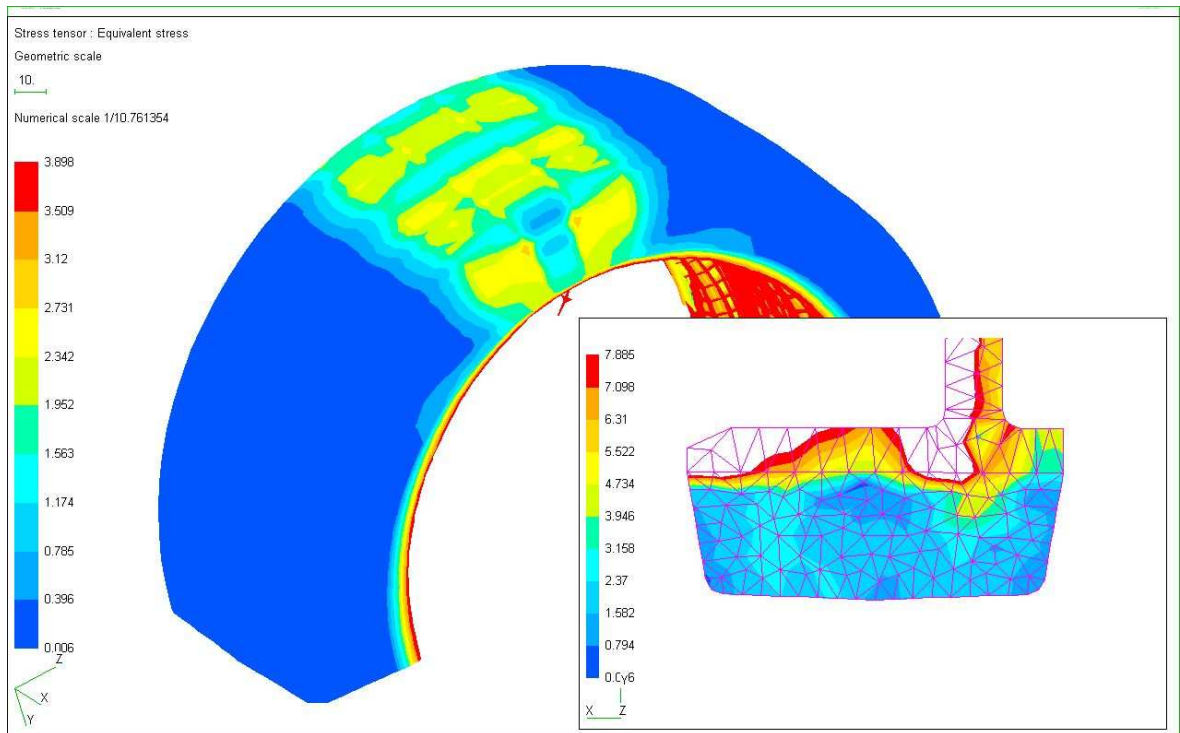
Obr.č. 24. Ekvivalentní napětí – axonometrické pohledy



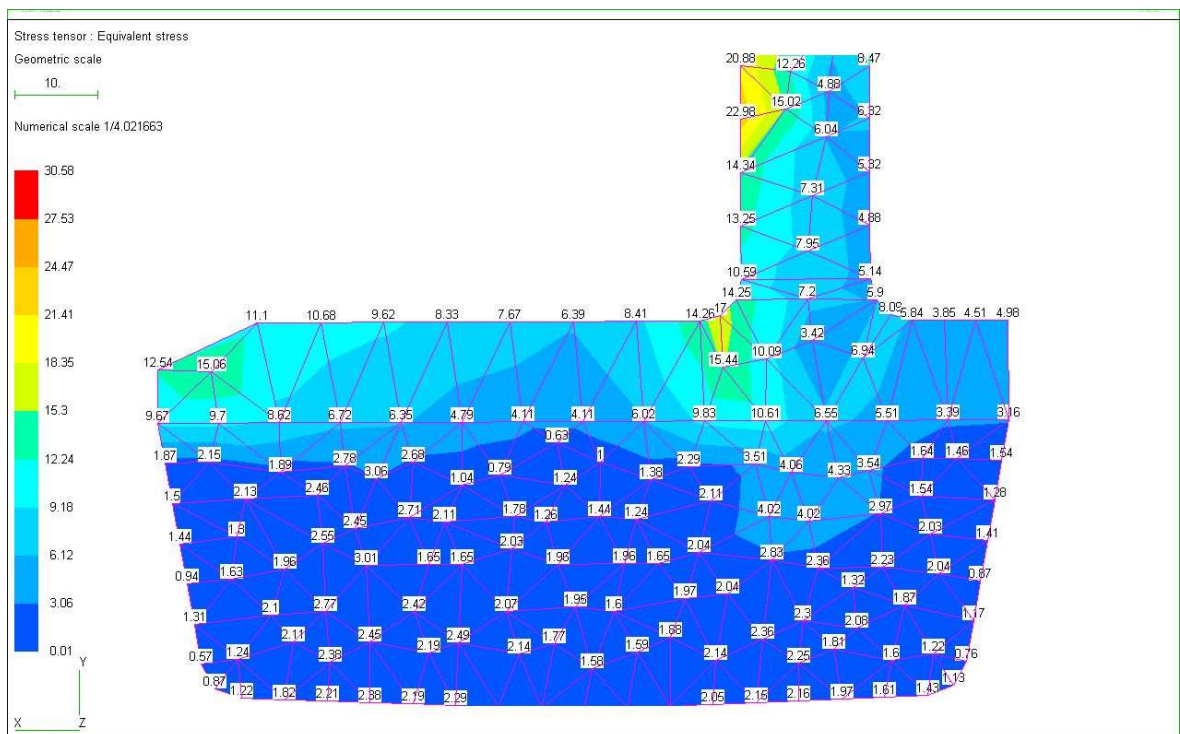
Obr.č. 25. Rozložení tenzoru deformace v poledníkovém řezu stopy



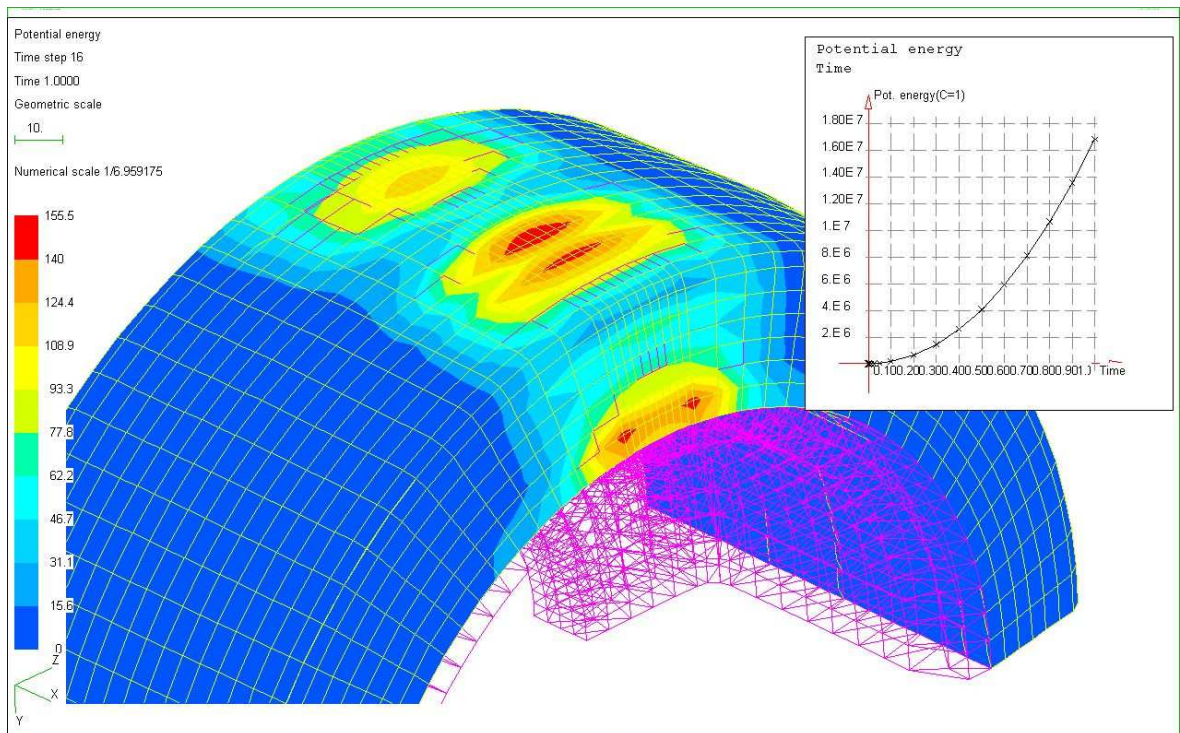
Obr.č. 26. Rozložení tenzoru deformace v meridiánovém řezu stopy



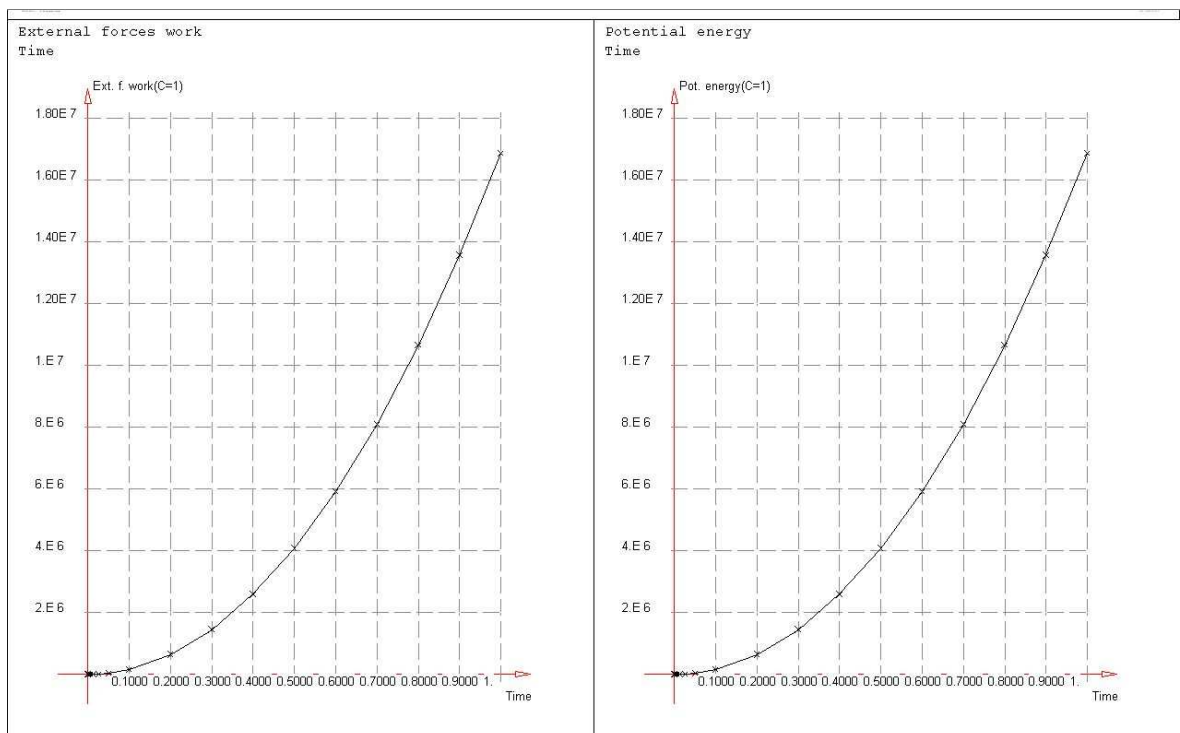
Obr.č. 27. Velikosti tenzoru napětí do 3,89MPa



Obr.č. 28. HMH napětí po průřezu kola-meridiánový řez

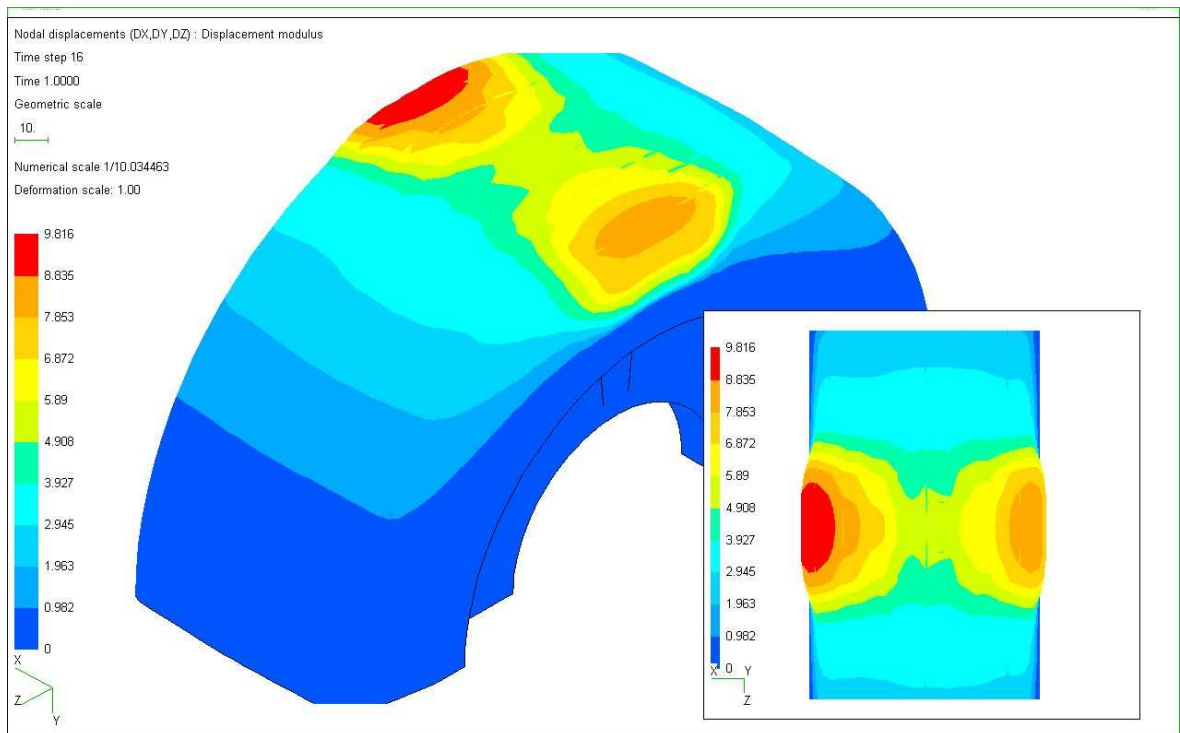


Obr.č. 29. Rozložení deformační energie napjatosti v pryžové obruči při kontaktním zatížení

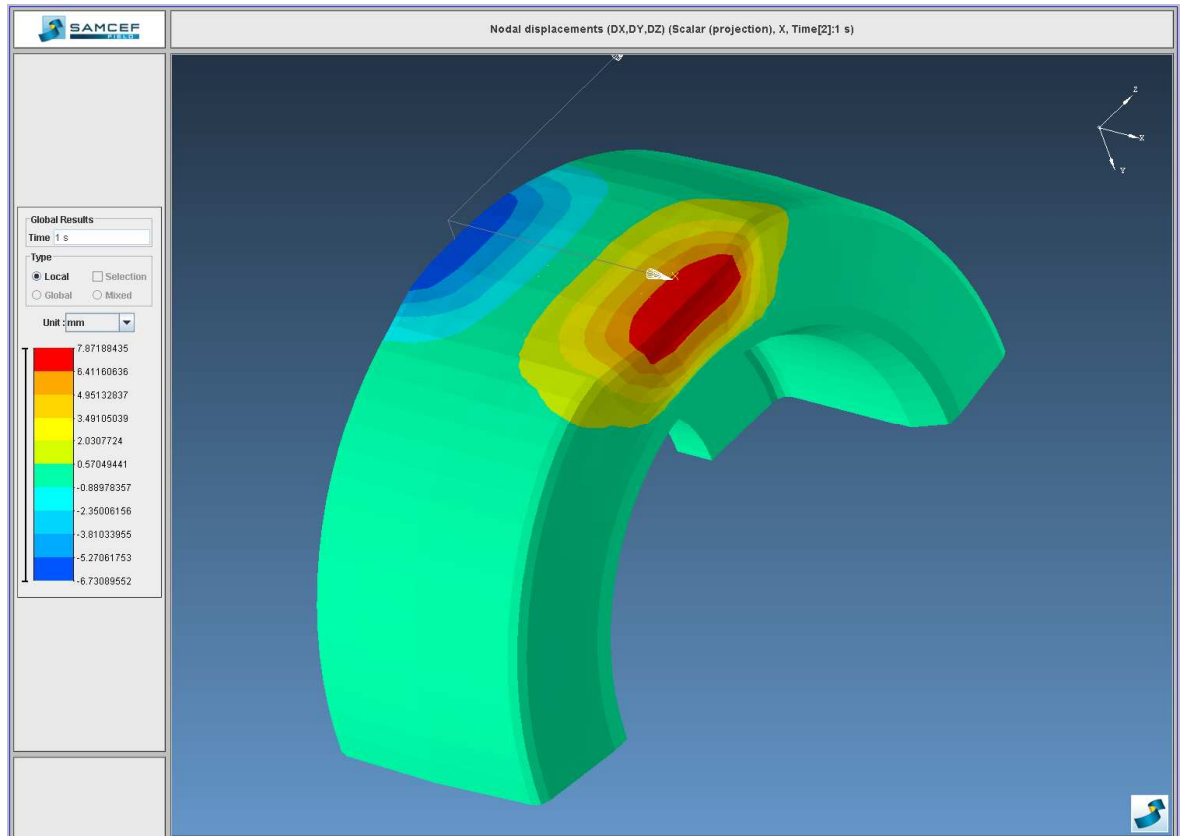


Obr.č. 30. Nelineární průběh funkce vnějšího zatížení e energie napjatosti

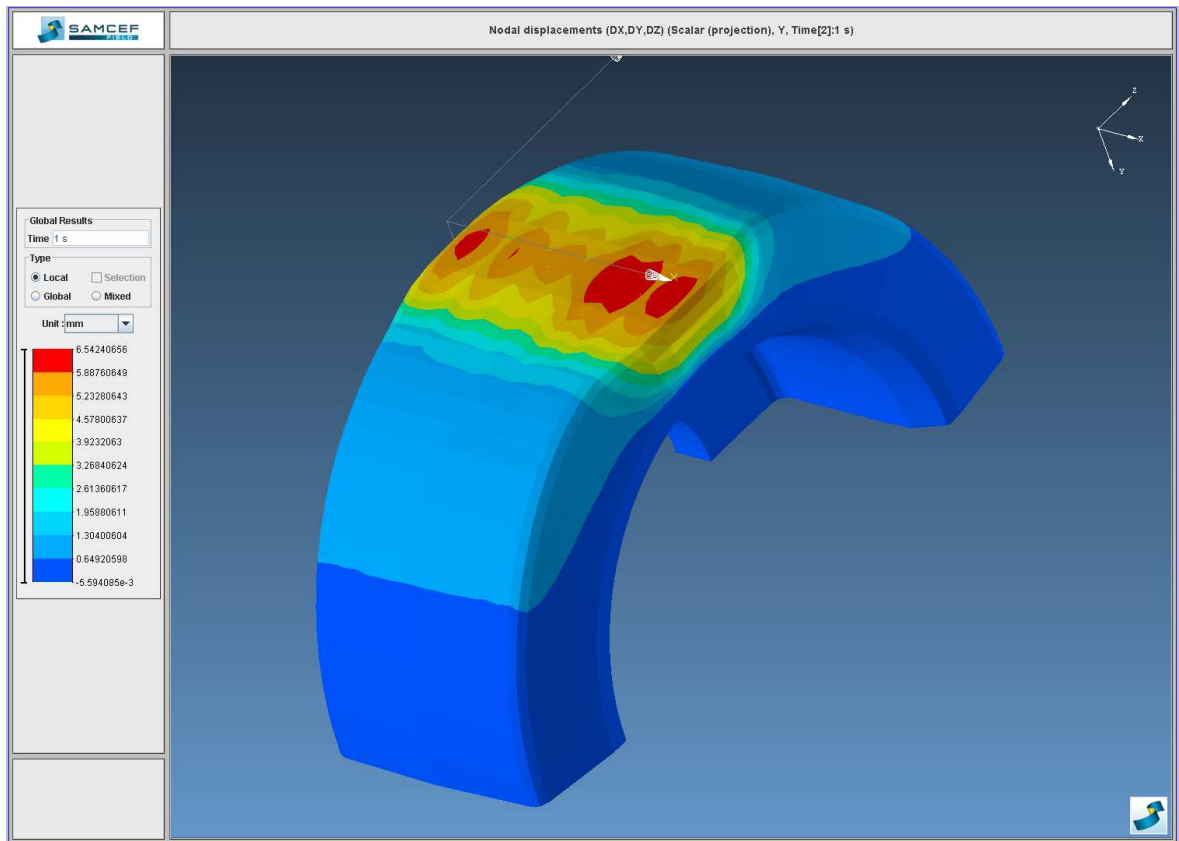
### 3.6.3 Deformace a napětí pro pojezdové kolo s obručí z měkkí směsi



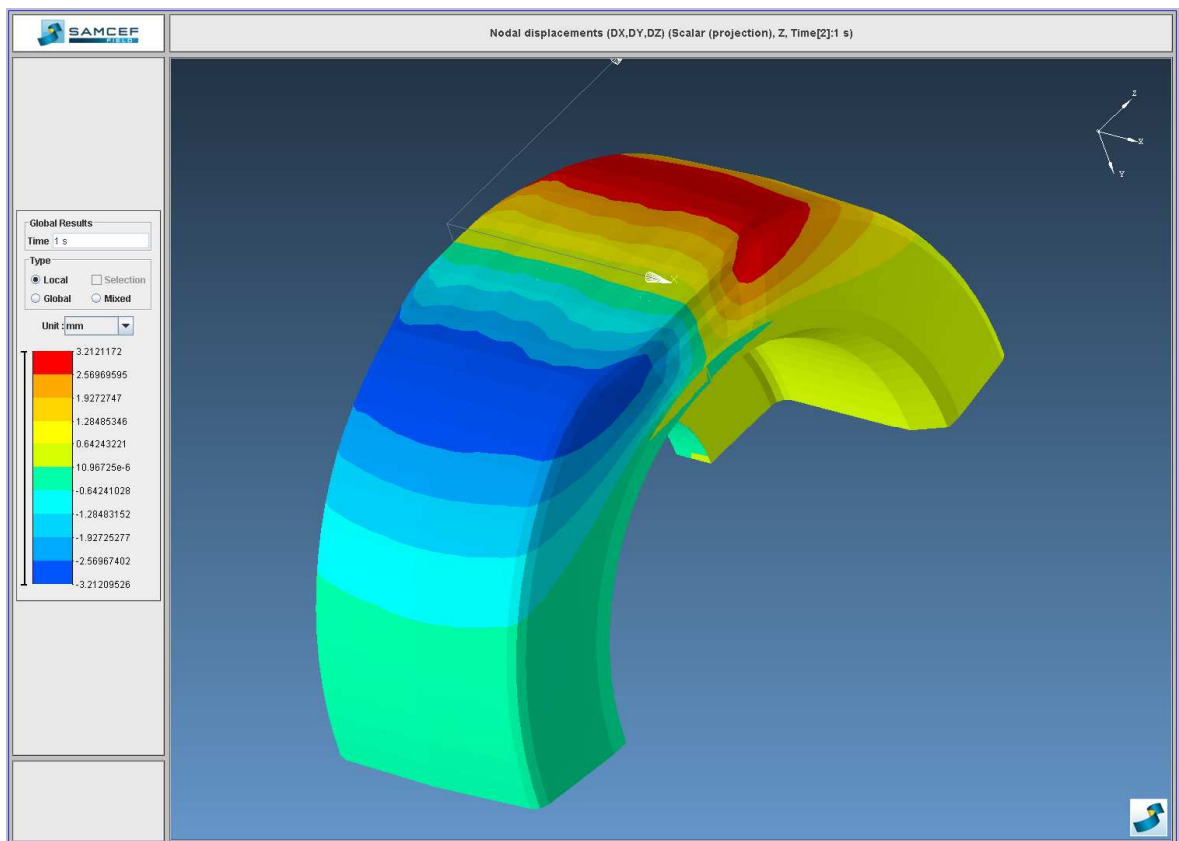
Obr.č. 31.Celková deformace



Obr.č. 32.Deformace v ose x

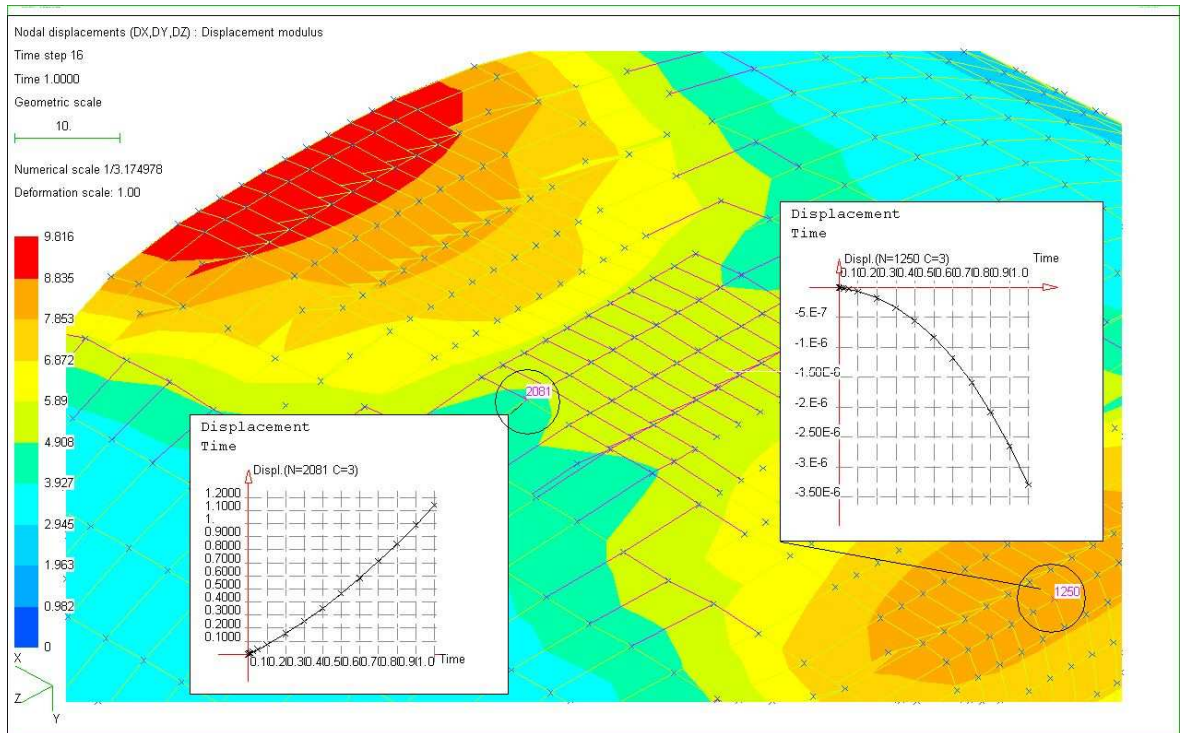


Obr.č. 33. Deformace v ose y

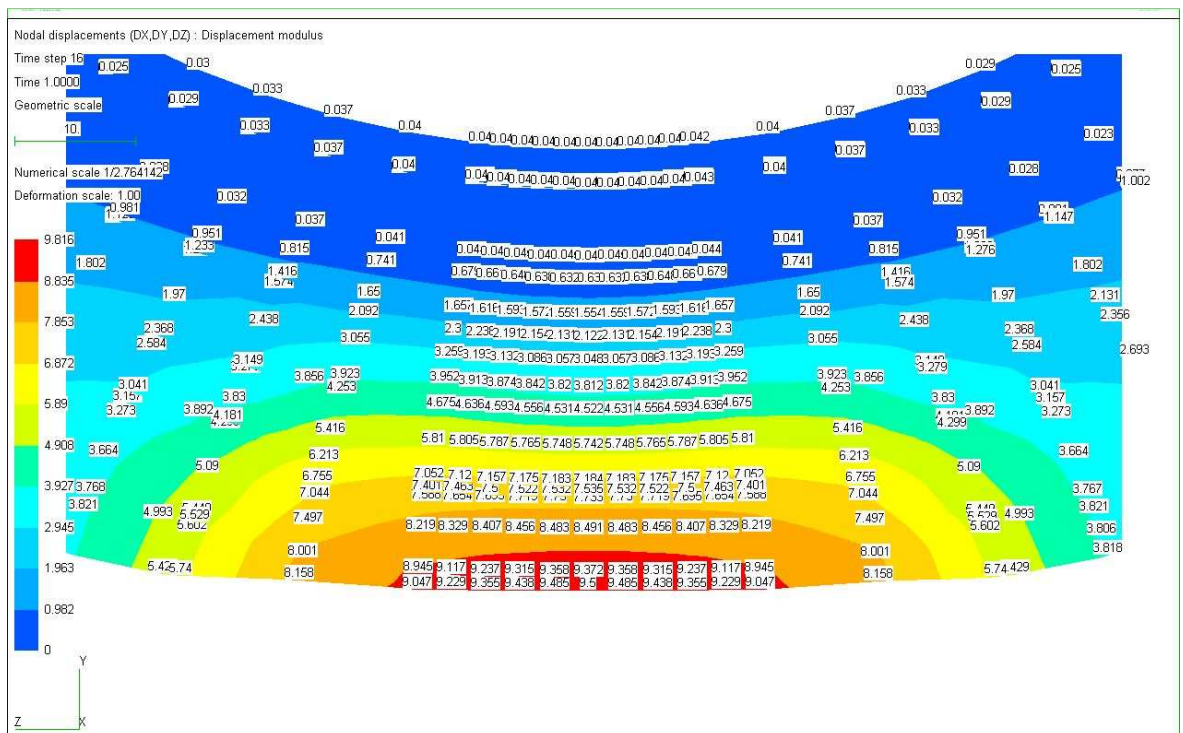


Obr.č. 34. Deformace v ose z

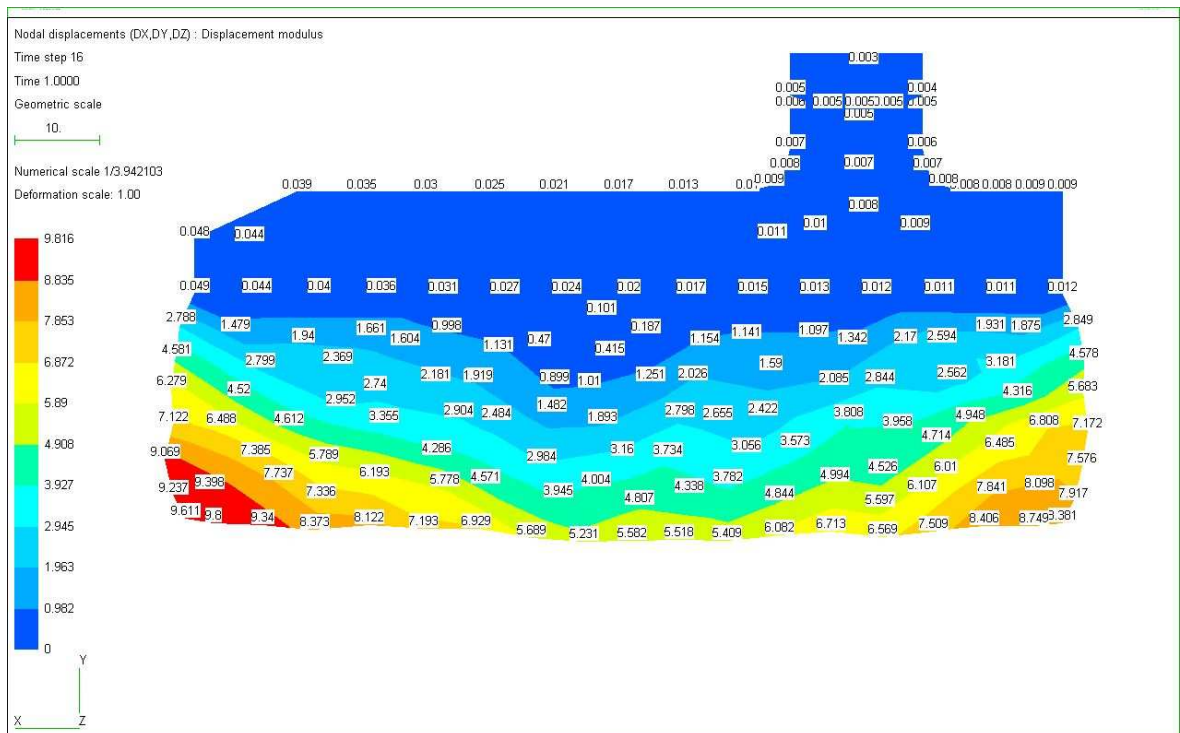




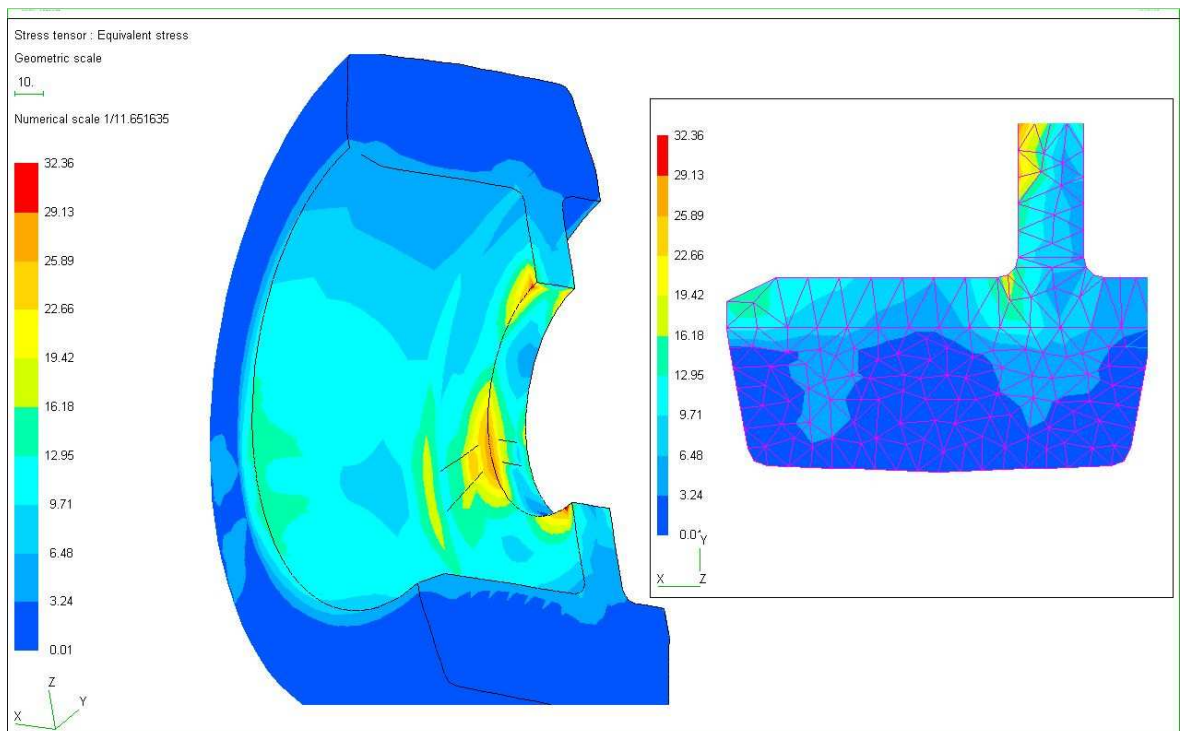
Obr.č. 35. Nelineární průběhy deformace ve dvou uzlech



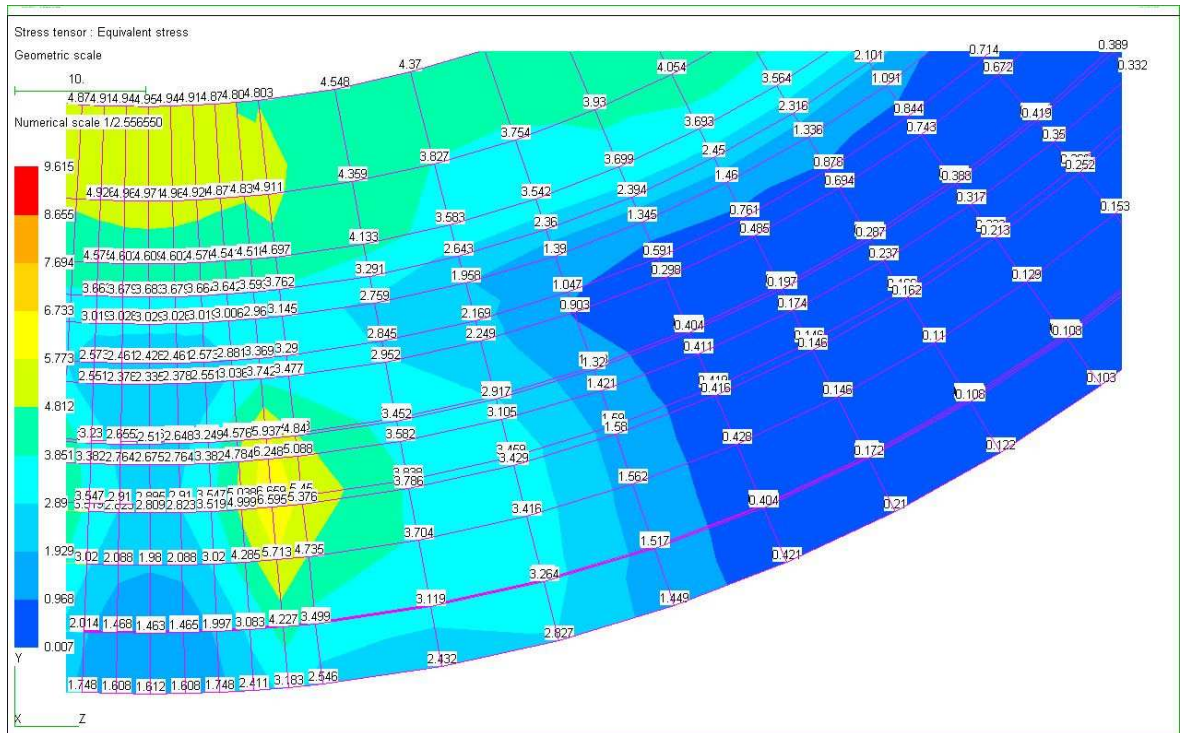
Obr.č. 36. Rozložení tenzoru deformace v poledníkovém řezu stopy



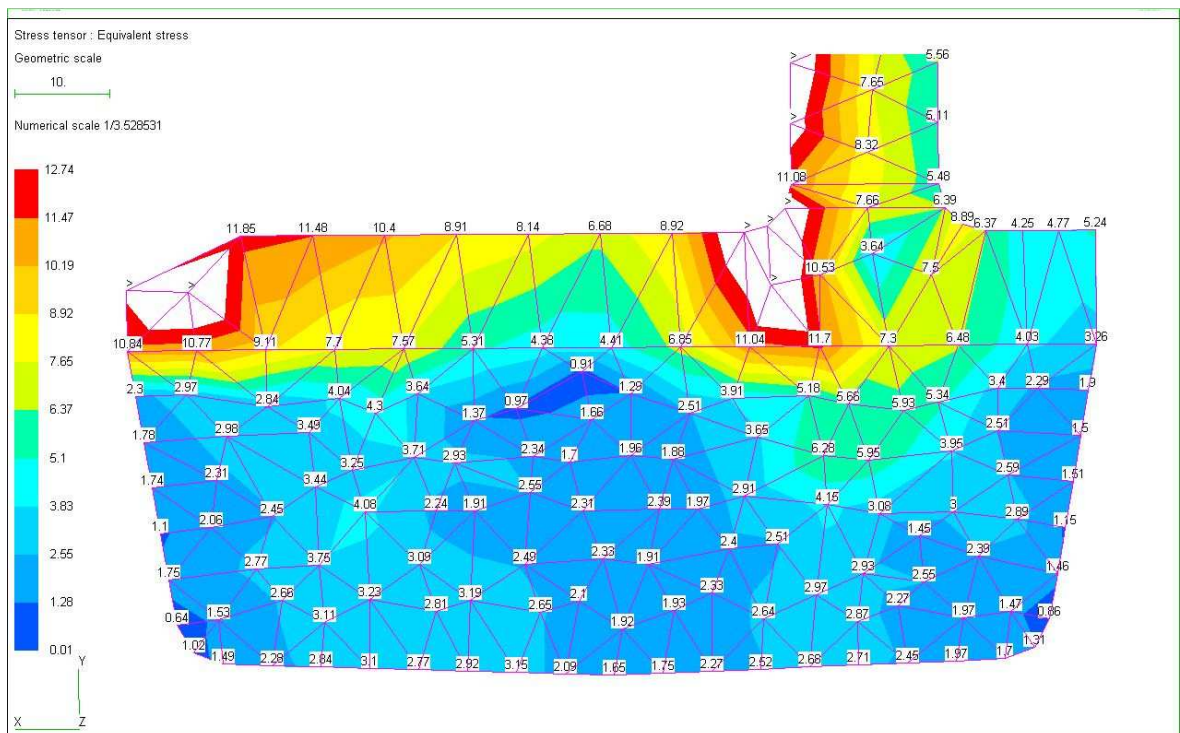
Obr.č. 37. Rozložení tenzoru deformace v meridiánovém řezu stopy



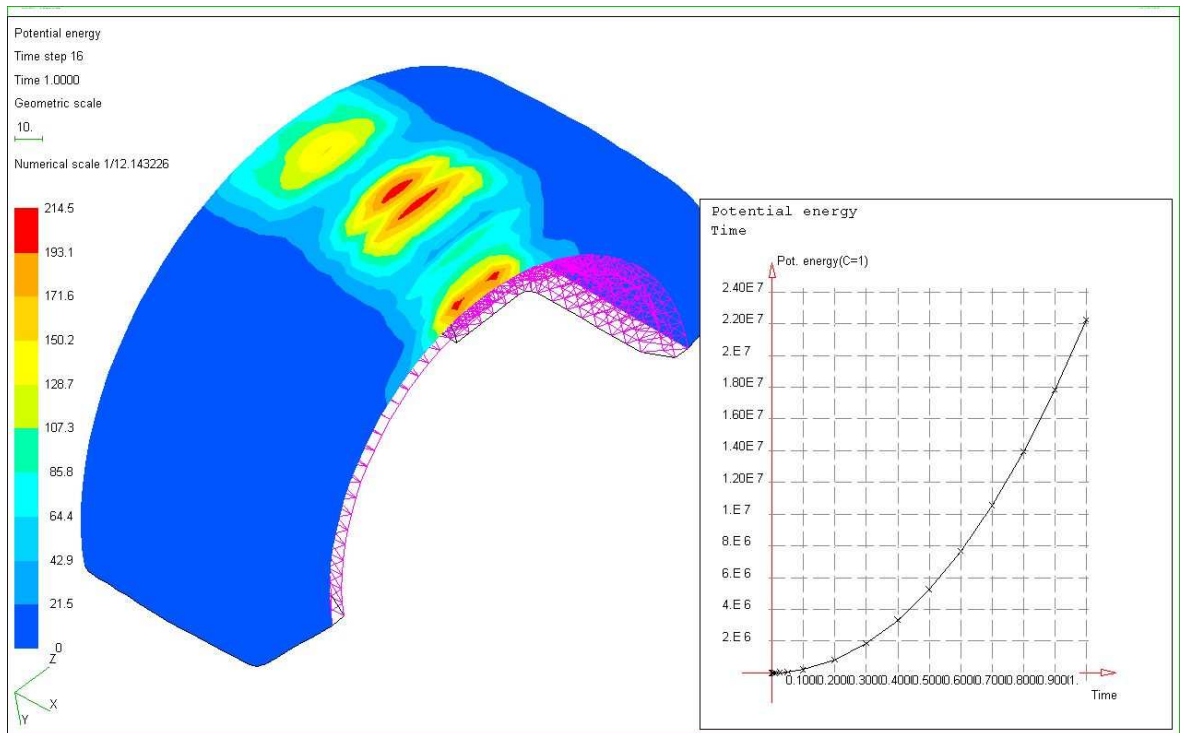
Obr.č. 38. Velikosti tenzoru HMH napětí



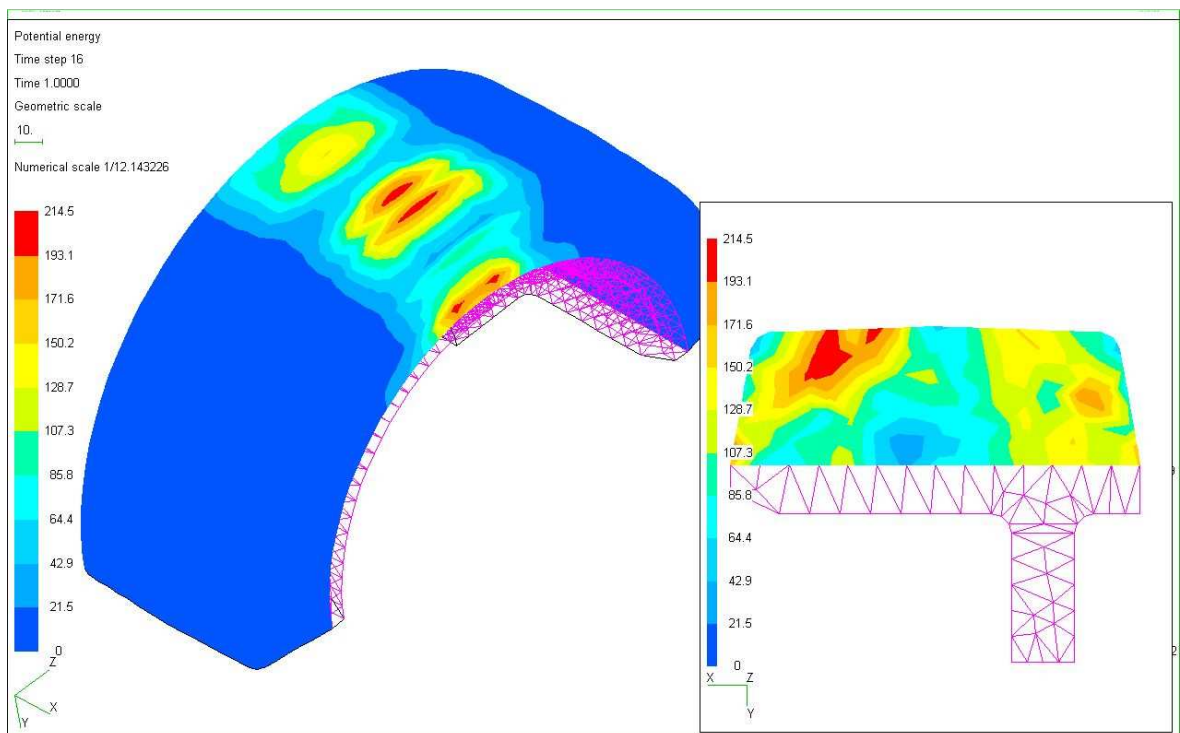
Obr.č. 39. Velikosti tenzoru HMM napětí-poledníkový řez- přechod z kontaktu



Obr.č. 40. . Rozložení tenzoru napětí v meridiánovém řezu stopy



Obr.č. 41. Rozložení deformační energie při kontaktním zatížení



Obr.č. 42. Rozložení deformační energie v řezu

### 3.7 Diskuze výsledků

V této kapitole jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty, které byly získány experimentálním měřením pro dva druhy kaučukových směsí. Dále jsou uvedeny hodnoty získané pevnostním výpočtem pomocí metody konečných prvků. Všechny výsledky byly vyhodnoceny a vzájemně porovnány.

#### 3.7.1 Výsledky tahové zkoušky

Pro získání základních materiálových vlastností, které jsou dány typem kaučukové směsi, byla provedena tahová zkouška. Při provádění této zkoušky bylo postupováno podle ČSN ISO 37 – Stanovení tahových vlastností. Byly získány tahové diagramy pro jednotlivé zkušební vzorky. Data z tahové zkoušky byly následně použity pro výpočet materiálových Mooney-Rivlinových konstant, které byly získány linearizací tahových křivek.

Tab.č.13. uvádí výsledky získané tahovou zkouškou. Hodnoty získané z tahové zkoušky byly získány při rychlosti posuvu čelistí při trhání  $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

*Tab.č. 13. Výsledky tahové zkoušky*

Směs	Pevnost v tahu při přetržení [Mpa]	Tažnost [%]	M100	M200	M300	M500
2500_224	24,57	1317,20	1,74	2,97	4,46	7,54
2500_225	16,22	1050,90	1,42	2,55	3,84	6,43

Směs 2500\_224 měla větší pevnost v tahu při přetržení a větší tažnost. Můžeme tedy předpokládat, že směs 2500\_224 bude mít větší tvrdost.

*Tab.č. 14. Výsledky získané linearizací  
tahových křivek*

Konstanta	Jednotka	Směs	
		2500_224	2500_225
<b>C1</b>	[MPa]	0,566	0,521
<b>C2</b>	[MPa]	0,266	0,112
<b>E</b>	[MPa]	4,993	3,799
<b>G</b>	[MPa]	1,664	1,267

Výsledky získané linearizací tahových křivek jsou uvedeny v Tab.č.14. Byly potvrzeny hodnoty naměřené při tahové zkoušce. Měkčí směs 2500\_225 má menší hodnotu Youngova modulu vtahu i ve smyku. Materiálové konstanty  $C_1$  a  $C_2$  byly také menší.

### 3.7.2 Výsledky odrazové pružnosti a tvrdosti

Odrázová pružnost byla provedena na přístroji Schob. Měření bylo provedeno třikrát pro tři vzorky. Pro měření tvrdosti byla použita metoda Shore A. Měření bylo provedeno pětkrát. Všechny měření probíhaly za laboratorní teploty.

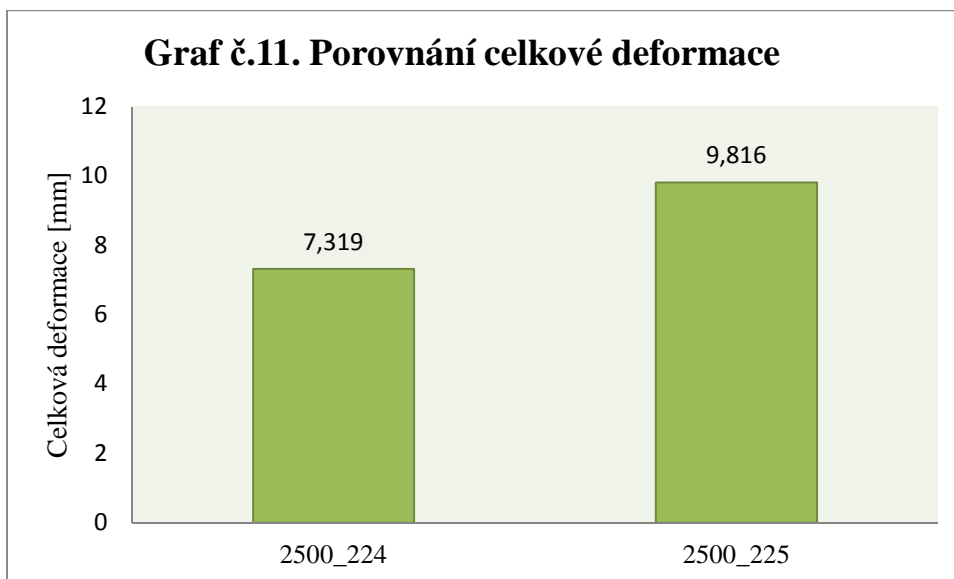
*Tab.č. 15. Výsledky odrazové pružnosti a tvrdosti*

	Jednotka	Směs	
		2500_224	2500_225
<b>Tvrdost</b>	[°Sh A]	70,2	60,8
<b>Odrázová pružnost</b>	[%]	40,1	60,8

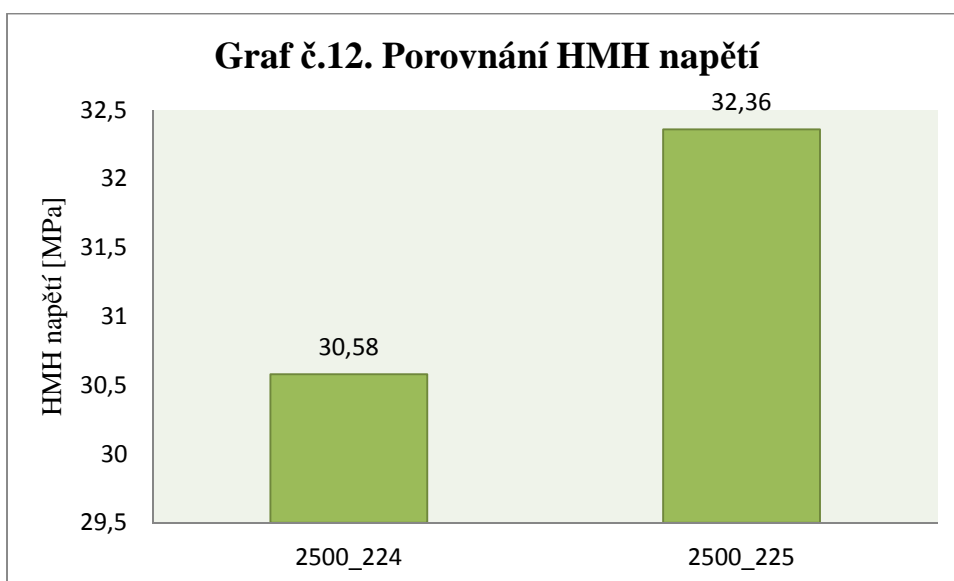
Výsledky získané měření tvrdosti a odrazové pružnosti (Tab.č.15) potvrdily předpoklady vyvozené na základě provedené tahové zkoušky. Směs 2500\_224 byla tvrdší a měla výrazně menší odrazovou pružnost než směs 2500\_225, která byla měkčí.

### 3.7.3 Výsledky výpočtu tenzoru napětí a deformace pomocí MKP

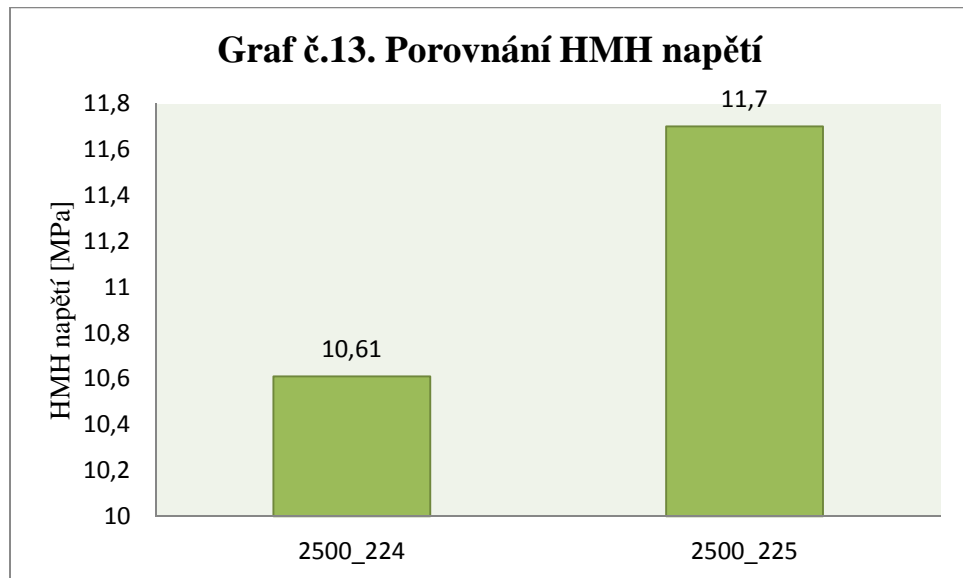
Pomocí metody konečných prvků byly vypočteny hodnoty tenzoru napětí a tenzoru deformace. Výsledky byly získány pro oba druhy směsí. Okrajové podmínky a zatížení byly pro obě směsi stejné. V grafech č.11, 12, 13 a 14 je uvedeno porovnání maximálních hodnot deformace, napětí a maximální deformační energie.



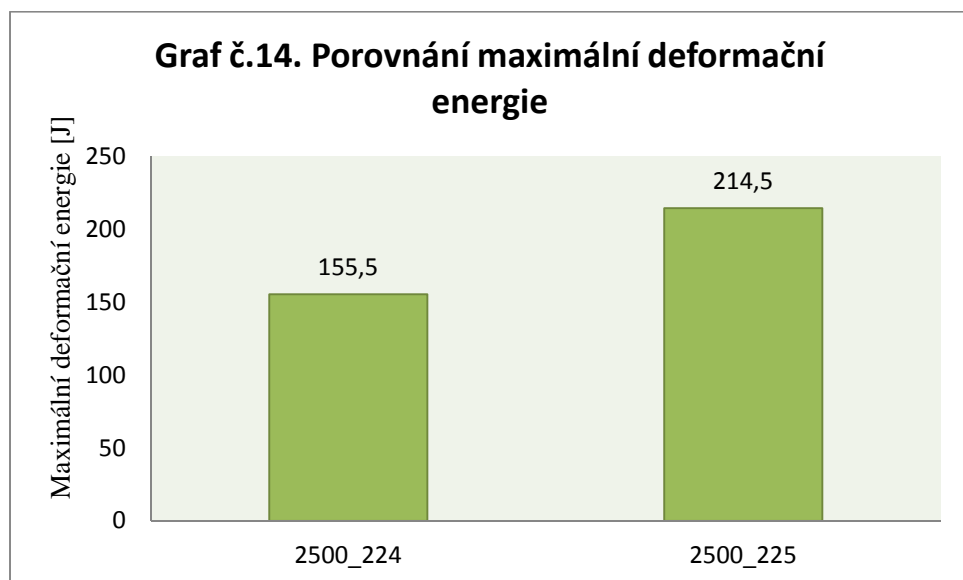
*Graf č. 11. Porovnání celkové deformace pro oba typy směsí*



*Graf č. 12. Porovnání HMH napětí pro ocelové disky podle typu obruče*

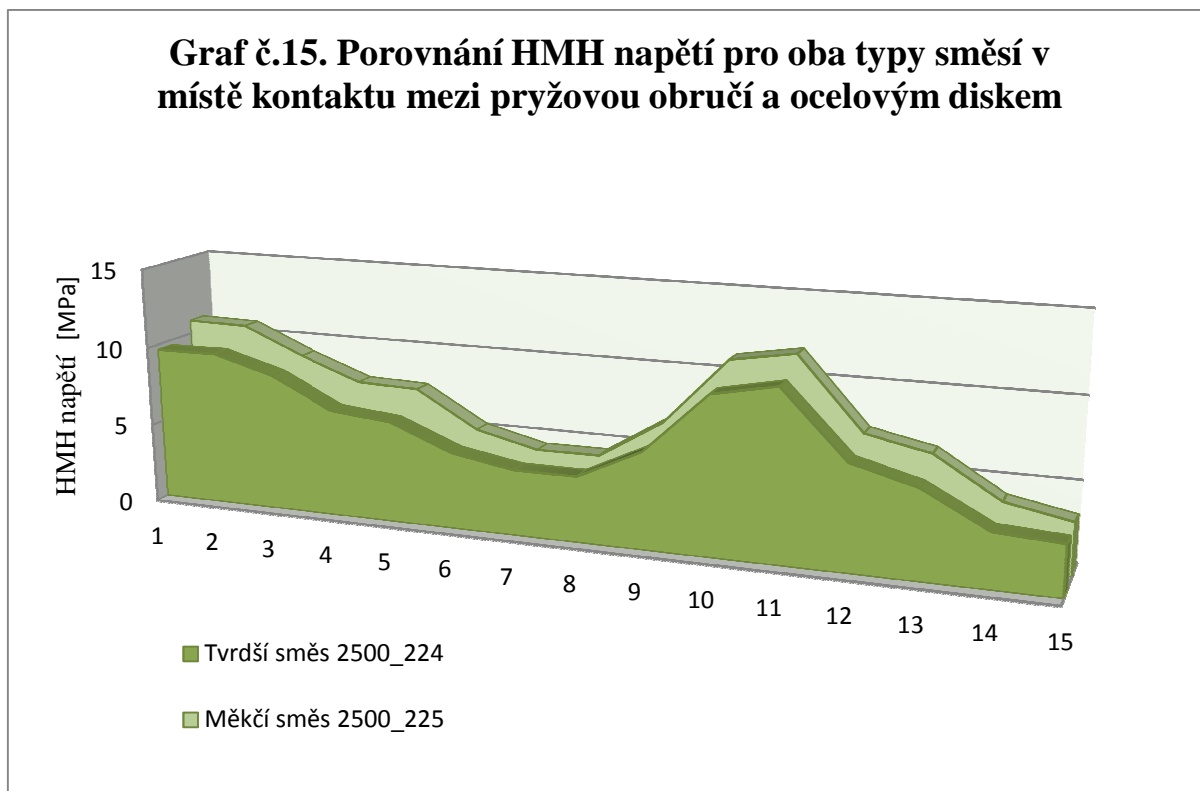


*Graf č. 13. Porovnání HMH napětí pro pryžové obruče ze dvou typů směsí*



*Graf č. 14. Porovnání maximální deformační energie pro oba typy směsí*





***Graf č.15. Porovnání HMH napětí pro oba typy směsí v místě kontaktu mezi pryžovou obručí a ocelovým diskem***

Tvrdší směs 2500\_224 měla ve srovnání s měkčí směsí 2500\_225 menší celkovou deformaci o 2,5 mm. Byly zjištěny i menší hodnoty HMH napětí pro ocelové disky o 1,78 MPa, menší hodnoty HMH napětí pro pryžové obruče o 1,09 MPa a menší hodnoty maximální deformační energie o 59 J. Graf č. 15. ukazuje rozdíly HMH napětí mezi tvrdší a měkčí směsí v místě kontaktu mezi kovem a pryží.

Součástí výsledků pevnostního výpočtu byla i kontrola Poissonovykonstanty. Obě směsi jsou prakticky nestlačitelné.

***Tab.č. 16.Hodnoty Poissonova poměru***

Směs	$\nu$
<b>Tvrdší 2500_224</b>	0,49917
<b>Měkčí 2500_225</b>	0,49937

Nelineární průběhy deformace ve dvou vybraných uzlech na Obr.č.35 a nelineární rozložení deformační energie na Obr.č.29 a Obr.č.41 jsou jasným důkazem, že se jedná o nelineární úlohu.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá studiem materiálových charakteristik hyperelastické obruče pro výrobu pojezdového kola a vlivem těchto vlastností na napjatost při zatěžování. Pro analýzu byly použity dva druhy kaučukové směsi, kterou dodala firma *WICKE.cz*. Pro určení základních materiálových vlastností, Mooney-Rivlinových konstant a Youngova modulu pružnosti v tahu byly použity zkušební metody. Naměřené hodnoty byly použity pro pevnostní výpočet k získání rozložení tenzoru napětí a deformace.

Surové neztvrdňované směsi byly nejprve zpracovány a ztvrdňovány. Ze ztvrdňovaných pryžových desek byla, podle normy ČSN ISO 37 – Stanovení tahových vlastností, vyseknuta zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek. Byla provedena tahová zkouška, ze které byly získány deformačně-napěťové závislosti. Tvar tahových křivek měl nelineární esovitý průběh, který je typický pro hyperelastické materiály.

Byla provedena linearizace tahových křivek, ze kterých byly získány Mooney-Rivlinovi konstanty  $C_1$  a  $C_2$ . Z materiálových konstant byl vypočten Youngův modul pružnosti v tahu  $E$  a ve smyku  $G$ .

Dále byla provedena zkouška tvrdosti a odrazové pružnosti. Výsledky materiálových zkoušek jsou uvedeny v Tab.č.17.

*Tab.č. 17. Výsledky materiálových zkoušek*

Směs	Pevnost v tahu při přetržení [Mpa]	Tažnost [%]	Tvrdost [°Sh A]	Odrazová pružnost [%]	$C_1$	$C_2$	$E$ [Mpa]	$G$ [Mpa]
2500_224	24,57	1317,2	70,2	40,1	0,566	0,266	4,993	1,664
2500_225	16,22	1050,9	60,8	60,8	0,521	0,112	3,799	1,267

Konstanty  $C_1$  a  $C_2$  byly použity pro dosazení do dvouparametrového Mooney-Rivlinova modelu, který byl použit při pevnostních výpočtech v softwaru SAMCEF a Samcef Field za pomoci metody konečných prvků.

Byl namodelován 3-D model pojezdového kola pro dva typy směsí. Pro oba modely byly zadány stejné okrajové podmínky a stejný zátěžový stav. Výsledky získané s pevnostních výpočtů pomocí metody konečných prvků jsou uvedeny v Tab.č.18.

*Tab.č. 18. Výsledné hodnoty získané z pevnostních výpočtů pomocí MKP*

	Jednotka	Směs	
		2500_224	2500_225
<b>Celková deformace</b>	[mm]	7,319	9,816
<b>HMH napětí ocelového disku</b>	[MPa]	30,58	32,36
<b>HMH napětí pryžové obruče</b>	[MPa]	10,61	11,70
<b>Maximální deformační energie</b>	[J]	155,5	214,5

Pomocí MKP byly vypočteny velikosti tenzorů napětí a deformace v objemu konstrukce kola. Při zatížení  $p = 1,6$  MPa (820 kg) v kontaktní stopě vykazovala tvrdší směs 2500\_224 menší hodnoty celkové deformace. U měkčí směsi 2500\_225 byly vypočteny větší hodnoty HMH napětí. Porovnání HMH napětí v místě kontaktu mezi pryžovou obručí a ocelovým diskem ukazuje, že měkčí směs vykazovala větší hodnoty napětí v interaci s kovovým diskem. Zároveň měkčí směsi vykazovala i větší hodnotu maximální deformační energie.

Z výsledků získaných pevnostními výpočty pomocí metody konečných prvků odhaduji, že u měkčí směsi 2500\_225 je větší pravděpodobnost vzniku trhlin vlivem proměnných zatěžovacích sil v provozu, které mohou ovlivňovat únavový proces v pryžové obruči. Z vypočtených hodnot HMH napětí se potvrdilo, že v interaktivní ploše měkčí směsi a disku vznikají větší kontaktní napětí. Dále se domnívám, že u měkčí směsi může vlivem většího maxima deformační energie docházet k většímu opotřebení pryžové obruče než u obruče vyrobené z tvrdší směsi 2500\_224. Směs 2500\_225 bude mít pravděpodobně lepší tlumící vlastnosti.

Na základě výsledků provedených výpočtů a z hlediska provedených analýz a měření doporučuji při výrobě pojezdového kola o nosnosti 800 kg použít na pryžovou obruč

tvrdší směs 2500\_224. Měkčí směs 2500\_225 doporučuji pro menší zátěže a nerovné povrchy. Doporučuji ověřit moje závěry v technickém provozu při exploataci.

Pro přesnější analýzu možného přenosu vibrací a tlumení směsi, případně životnosti a únavy by bylo zapotřebí řešit tuto problematiku jako nelineární kontaktní úlohu se třením i s větším počtem zatěžovacích stavů. Časové i technické nároky pro tato řešení ale značně přesahují jak rámec diplomové práce, tak i rámec základní výuky na ÚFMI.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ŠTĚPÁN, M.. *Gumárenská technologie VI: Teoretické základy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 1965.
- [2] HOLUB, J. *Gumárenská technologie VII: Pryž jako konstrukční materiál*. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury,1967.
- [3] [www.wicke.cz](http://www.wicke.cz) [online].2012 [cit 2012-3-16]. Kola & Pojezdové kladky.Dostupné z WWW:<[http://www.wicke.cz/ke\\_stazeni/Katalog%20-%20zakladni%20sortiment.pdf](http://www.wicke.cz/ke_stazeni/Katalog%20-%20zakladni%20sortiment.pdf) >
- [4] [www.pojezdova-kola.cz](http://www.pojezdova-kola.cz) [online].2012 [cit 2012-3-18].Vysokozátěžová kola a kladky. Dostupné z WWW:  
<<http://www.pojezdova-kola.cz/ftp/Downloads/katalogVZ.pdf>>
- [5] [www.rader-leszno.pl](http://www.rader-leszno.pl)[online].2012 [cit 2012-3-25].KOLA 2003: Kola i zestawy kolowe. Dostupné z WWW:<<http://rader-leszno.pl/rader1.pdf>>
- [6] <http://www.pneu-asistent.cz>[online].2012 [cit 2012-4-2].Konstrukce, funkce a výroba pneumatiky. Dostupné z WWW:<<http://www.pneu-asistent.cz/Konstrukce-funkce-a-vyroba-pneumatiky.html>>
- [7] KOMÁREK, Z. *Přehled výroby pryže*. Praha: STNL - Nakladatelství technické literatury,1973.
- [8] MALÁČ,J. *Gumárenská technologie*. Učební text UTB, Zlín, 2005.
- [9] DUCHÁČEK,V. HRDLIČKA,Z. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*.4th ed. Praha: VŠCHT Praha, 2009. P.027. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [10] [www.tsplzen.cz](http://www.tsplzen.cz)[online].2012 [cit 2012-4-30]. Modernizace a generální opravy lisů. Dostupné z WWW.<<http://www.tsplzen.cz/cz/vulkanizacni-lisy-modernizace.asp>>
- [11] KRONEISL, L. *Nauka o materiálu*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 184 s.
- [12] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 174. ISBN 80-7080-617-6
- [13] PEREMSKÝ, R. a SAMEC, M. *Gumárenská technologie VIII: Tvrdá pryž*, SNTL Praha, 1968.

- [14] SCHÄTZ, M. *Kaučuk*, STNL Praha, 1965.
- [15] FRANTA, I. A kol. *Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti*, SNTL Praha, 1969.
- [16] LEPETOV, V.A. *Technická pryž*, STNL Praha, 1965.
- [17] JANÍČEK, P; ONDRÁČEK, E; VRBKA, J. *MECHANIKA TĚLES - Pružnost a pevnost I*. BRNO : VUT Brno, 2010. 287 s.
- [18] MEISSNER, B. a ZILVAR, V. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, SNTL Praha, 1987.
- [19] *Fo.cuni.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-05-24]. Mechanika pružného tělesa. Dostupné z WWW: <[fo.cuni.cz/texty/pruznost.pdf](http://fo.cuni.cz/texty/pruznost.pdf)>.
- [20] A Review of Constitutive Models for Rubber-Like Materials. *American J. of Engineering and Applied Sciences*. 2010, 3, 1, s. 232-239. ISSN 1941-7020.
- [21] URBAN, R. *Modelování konstrukčních prvků z pryže vyztužené nitěmi*, Disertační práce na Fakultě strojní v Liberci, 2004.
- [22] HOLZAPFEL, G.A. *Nonlinear Solid Mechanics – A Continuum Approach for Engineering*, John Willey & Sons Limited, 2000.
- [23] KUBÍK, J.; ZYTKA, A. *Zkušební metody v gumárenství*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 300 s.
- [24] JARUŠEK, J. *Metody zkoumání polymerů*. Pardubice : Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1984. 105 s.
- [25] ČSN ISO 37. *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tahových vlastností*. Praha : Český normalizační institut, Srpen 2006. 28 s.
- [26] ČSN EN ISO 868. *Plasty ebonit - Stanovení tvrdosti vlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha : Český normalizační institut, Říjen 2003. 12 s.
- [27] ČSN 62 1480. *Stanovení odrazové pružnosti pryže*. Praha : Český normalizační institut, Listopad 1992. 8 s.
- [28] *www.mail.sstzr.cz*[online].2012 [cit 2012-4-19].Technická pryž, kůže a textilie. Dostupné z WWW:<<http://mail.sstzr.cz/web/download/cat1/strojirenska-technologie.pdf>>.

- [29] [www.commons.wikimedia.org](http://www.commons.wikimedia.org)[online].2012 [cit 2012-4-20].Spanning rek diagramma rubber. Dostupné z WWW: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spanning\\_rek\\_diagramma\\_rubber.PNG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spanning_rek_diagramma_rubber.PNG)>
- [30] MARTINÁK,M. *Kontrola a měření pro 3.ročník SPŠ strojnických*. 1.vyd. Praha: SNTL,1989
- [31] ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L., *Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics (6th Edition)*, Elsevier, 2005
- [32] HINTON, E. *Numerical Methods and Software for Dynamic analysis of Plates and Shells*, Swansea, UK, 1988.
- [33] <http://www.britannica.com>[online].2012 [cit 2012-3-28].POLYISOPRENE (NATURAL RUBBER, NR; ISOPRENE RUBBER, IR). Dostupné z WWW: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/468698/major-industrial-polymers/76453/Polychloroprene-chloroprene-rubber-CR>>.
- [34] [www.klanalytical.com](http://www.klanalytical.com)[online].2012 [cit 2012-5-1]. Shimadzu Autograph AG-X Series. Dostupné z WWW: <[http://www.klanalytical.com/KLA\\_Shimadzu\\_AG-X.html](http://www.klanalytical.com/KLA_Shimadzu_AG-X.html)>.
- [35] BURŠA,J. *Opory předmětu Nelineární mechanika v MKP. VUT Brno. 2009*

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a$	šířka tělesa
$A$	průřez tělesa
$A_0$	původní průřez tělesa
[B]	transformační matice
$c_{ij}$	konstanty popisující chování materiálu ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ )
$C_1, C_2$	materiálové konstanty
$d$	parametr nestlačitelnosti materiálu
$d$	vnitřní průměr ložiska
$\{d\}$	vektor uzlových posunutí celého systému
$\{d\}^e$	vektor uzlových posunutí elementu
$[d]^e$	vektor zobecněných posuvů
$D$	průměr kola
[D]	matice fyzikálních konstant
$dV$	objemový element
$d\Gamma$	element povrchové plochy
$E$	Youngův modul pružnosti
$\varepsilon$	deformace
$\varepsilon_l$	poměrné prodloužení
$\varepsilon_a$	příčné zkrácení
$\varepsilon_x$	poměrné prodloužení v ose x
$\{\varepsilon_T\}$	přetvoření působením tepla
$\{f\}$	vektor zatížení celého systému
$\{f\}^e$	vektor zatížení v uzlech



$F$	působící síla
$f$	nespecifikovaná funkce druhého invariantu pravého Cauchyho tenzoru deformace
$G$	modul pružnosti ve smyku
$I_1, I_2, I_3$	invarianty deformace
$\bar{I}_1$	modifikace prvního invariantu pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace
$J$	objemový poměr – Jacobeanův determinant
$J_{el}$	elastický objemový poměr
$J_{th}$	teplotní objemový poměr
$J_m$	limitní hodnota výrazu $I_1 - 3$
$[k]^e$	matice tuhosti elementu
$K$	počáteční modul objemové pružnosti
$KS$	kaučuková směs
$[K]$	matice tuhosti celého systému
$l$	délka tělesa
$L$	celková délka tělesa po protažení
$L_0$	délka tělesa před protažením
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	hlavní poměrná protažení
$\lambda_L$	limitní síťové protažení
$m$	celkový počet uzlů tělesa
$M$	průměr náboje
$M_x$	gumárenský modul
$M$	počáteční smykový modul
$\mu_{MR}$	smykový modul
$n$	počet elementů

---

$N$	konstanta určující počet podmínek ve $W$ funkci ( $N = 1, 2, 3$ )
$[N]$	matice interpolačních funkcí
$\Pi$	funkcionál celkové potenciální energie systému
$\Pi_i$	vnitřní energii systému
$\Pi_z$	práce vykonané vnějšími silami
$\Pi^e$	funkcionál celkové potenciální energie elementu
$p$	tlak
$r$	počet uzlů na elementu
$R$	hodnota odrazové pružnosti v procentech
$\sigma$	normálové napětí
$\sigma_{\max}$	maximální napětí
$\sigma_{\text{nom}}$	nominální napětí
$\Delta T$	teplotní rozdíl proti referenční teplotě
$T1$	šířka náboje
$T2$	šířka obruče
$W$	funkce deformační energie
$\Delta x$	změna rozměru v ose $x$
$\Delta y$	změna rozměru v ose $y$
$\nu$	Poissonův poměr
$u, v, w$	posuvy v osách $x, y, z$
$MKP$	metoda konečných prvků

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.č. 1.</i> Schéma pojezdového kola s ložiskem[4] .....	13
<i>Obr.č. 2.</i> Vulkanizační lis[10] .....	17
<i>Obr.č. 3.</i> Schéma tvorby příčných vazeb[6] .....	18
<i>Obr.č. 4.</i> Strukturní vzorec přírodního kaučuku[33] .....	21
<i>Obr.č. 5.</i> Značení technické pryže[28] .....	23
<i>Obr.č. 6.</i> Tahový diagram – houževnatá ocel[19] .....	25
<i>Obr.č. 7.</i> Průběh deformace elastomerního materiálu[29] .....	28
<i>Obr.č. 8.</i> Schéma mechanického a hydraulického univerzálního .....	34
<i>Obr.č. 9.</i> Zkušební hroty tvrdoměrů Shore A a Shore D[26].....	37
<i>Obr.č. 10.</i> Zkušební těleso ve tvaru oboustranné lopatky[25].....	45
<i>Obr.č. 11.</i> Vysekávací nůž pro zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek[25] .....	46
<i>Obr.č. 12.</i> .. trhací stroj Ultra-High-precision Universal .....	47
<i>Obr.č. 13.</i> Technický výkres pojezdového kola .....	61
<i>Obr.č. 14.</i> Model pojezdového kola s konečným počtem prvků .....	62
<i>Obr.č. 15.</i> Průřez kola – konečné prvky pro ocel a pro pryž.....	62
<i>Obr.č. 16.</i> Okrajové podmínky .....	63
<i>Obr.č. 18.</i> Zatížení tlakem $p=1,6\text{MPa}$ v kontaktní stopě .....	64
<i>Obr.č. 17.</i> Otisk kontaktní plochy .....	64
<i>Obr.č. 19.</i> Časová funkce zatížení pro tlak $p=1,6\text{MPa}$ v kontaktní stopě .....	65
<i>Obr.č. 20.</i> Velikost celkové deformace – konvergence .....	65
<i>Obr.č. 21.</i> Deformace v ose $x$ .....	66
<i>Obr.č. 22.</i> Deformace v ose $y$ .....	66
<i>Obr.č. 23.</i> Deformace v ose $z$ .....	67
<i>Obr.č. 24.</i> Ekvivalentní napětí – axonometrické pohledy .....	67
<i>Obr.č. 25.</i> Rozložení tenzoru deformace v poledníkovém řezu stopy .....	68
<i>Obr.č. 26.</i> Rozložení tenzoru deformace v meridiánovém řezu stopy.....	68
<i>Obr.č. 27.</i> Velikosti tenzoru napětí do $3,89\text{MPa}$ .....	69
<i>Obr.č. 28.</i> HMH napětí po průřezu kola-meridiánový řez.....	69
<i>Obr.č. 29.</i> Rozložení deformační energie napjatosti v pryžové obruči při kontaktním zatížení.....	70
<i>Obr.č. 30.</i> Nelineární průběh funkce vnějšího zatížení $e$ energie napjatosti .....	70
<i>Obr.č. 31.</i> Celková deformace .....	71

---

<i>Obr.č. 32.</i> Deformace v ose $x$ .....	71
<i>Obr.č. 33.</i> Deformace v ose $y$ .....	72
<i>Obr.č. 34.</i> Deformace v ose $z$ .....	72
<i>Obr.č. 35.</i> Nelineární průběhy deformace ve dvou uzlech.....	73
<i>Obr.č. 36.</i> Rozložení tenzoru deformace v poledníkovém řezu stopy .....	73
<i>Obr.č. 37.</i> Rozložení tenzoru deformace v meridiánovém řezu stopy.....	74
<i>Obr.č. 38.</i> Velikosti tenzoru $HMH$ napětí .....	74
<i>Obr.č. 39.</i> Velikosti tenzoru $HMH$ napětí-poledníkový řez- přechod z kontaktu.....	75
<i>Obr.č. 40.</i> . Rozložení tenzoru napětí v meridiánovém řezu stopy.....	75
<i>Obr.č. 41.</i> Rozložení deformační energie při kontaktním zatížení.....	76
<i>Obr.č. 42.</i> Rozložení deformační energie v řezu .....	76

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab.č. 1.Použití syntetických kaučuků ve vybraných výrobcích[1]</i> .....	22
<i>Tab.č. 2.Předepsané vlastnosti směsi 2500_224</i> .....	44
<i>Tab.č. 3.Předepsané vlastnosti směsi 2500_225</i> .....	44
<i>Tab.č. 4.Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa</i> .....	46
<i>Tab.č. 5.Délka pracovní části oboustranných lopatek[25]</i> .....	47
<i>Tab.č. 6.Výsledky tahové zkoušky směsi 2500_225</i> .....	48
<i>Tab.č. 7.Výsledky tahové zkoušky směsi 2500_224</i> .....	49
<i>Tab.č. 8.Materiálové konstanty směsi 2500_225</i> .....	54
<i>Tab.č. 9.Materiálové konstanty směsi 2500_224</i> .....	57
<i>Tab.č. 10.Naměřené hodnoty odrazové</i> .....	58
<i>Tab.č. 11.Naměřené hodnoty odrazové</i> .....	58
<i>Tab.č. 12.Naměřené hodnoty tvrdosti</i> .....	59
<i>Tab.č. 13.Výsledky tahové zkoušky</i> .....	77
<i>Tab.č. 14. Výsledky získané linearizací</i> .....	78
<i>Tab.č. 15. Výsledky odrazové pružnosti a tvrdosti</i> .....	78
<i>Tab.č. 16.Hodnoty Poissonova poměru</i> .....	81
<i>Tab.č. 17.Výsledky materiálových zkoušek</i> .....	82
<i>Tab.č. 18.Výsledné hodnoty získané z pevnostních výpočtů pomocí MKP</i> .....	83

**SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf č.1.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_225_1 .....</i>	52
<i>Graf č.2.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_225_2 .....</i>	52
<i>Graf č.3.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_225_3 .....</i>	53
<i>Graf č.4.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_225_4 .....</i>	53
<i>Graf č.5.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_225_5 .....</i>	54
<i>Graf č.6.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_224_1 .....</i>	55
<i>Graf č.7.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_224_2 .....</i>	55
<i>Graf č.8.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_224_3 .....</i>	56
<i>Graf č.9.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_224_4 .....</i>	56
<i>Graf č.10.Linearizace tahové křivky vzorku 2500_224_5 .....</i>	57
<i>Graf č. 11. Porovnání celkové deformace pro oba typy směsí .....</i>	79
<i>Graf č. 12. Porovnání HMH napětí pro ocelové disky podle typu obruče .....</i>	79
<i>Graf č. 13. Porovnání HMH napětí pro pryžové obruče ze dvou typů směsí .....</i>	80
<i>Graf č. 14. Porovnání maximální deformační energie pro oba typy směsí .....</i>	80
<i>Graf č.15. Porovnání HMH napětí pro oba typy směsí v místě kontaktu mezi pryžovou obručí a ocelovým diskem.....</i>	81

**SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA PI: TAHOVÉ KŘIVKY PRO SMĚSI 2500\_225**

**PŘÍLOHA PII: TAHOVÉ KŘIVKY PRO SMĚSI 2500\_224**

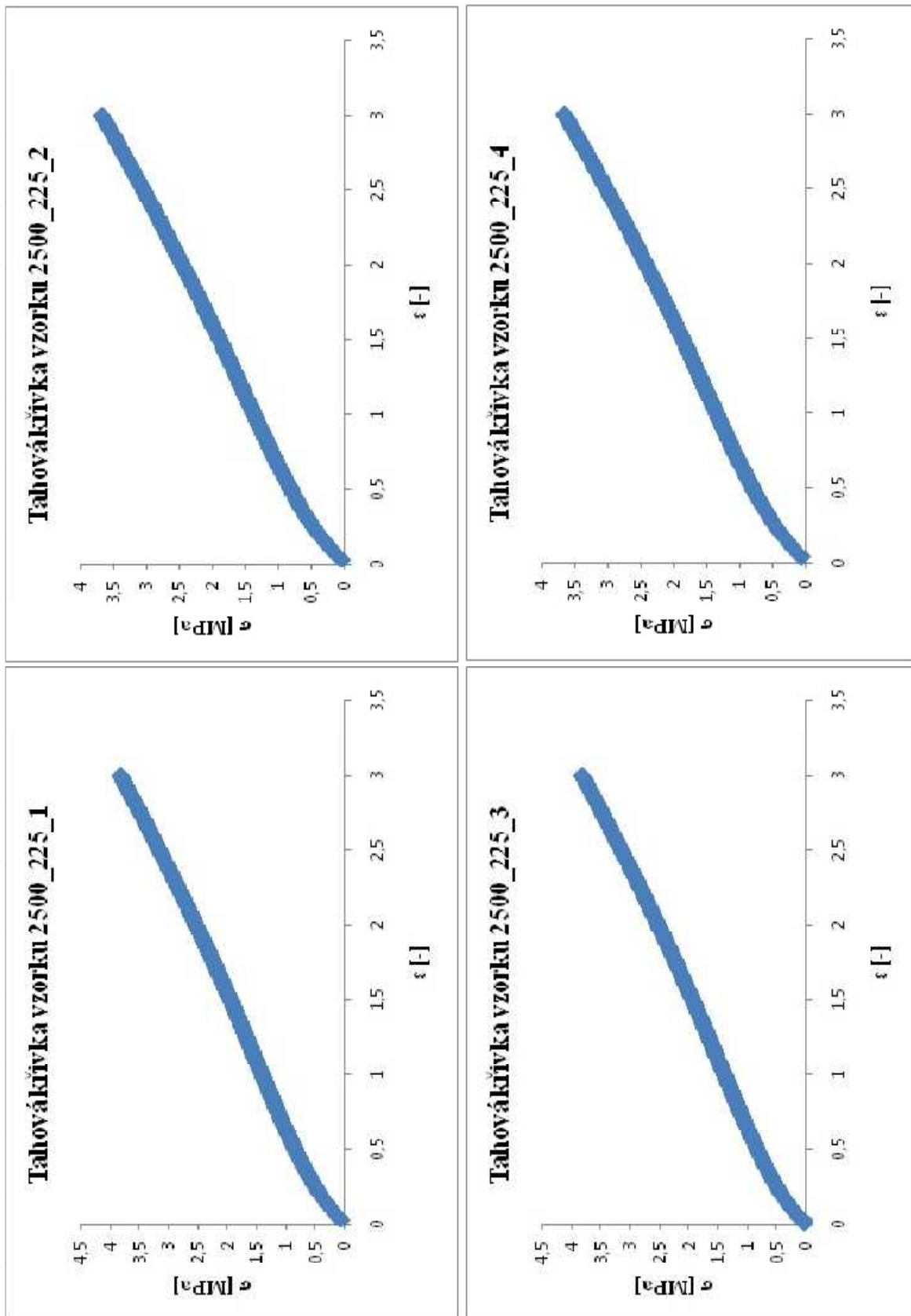
**PŘÍLOHA PIII: LINEARIZACE TAHOVÝCH KŘIVEK 2500\_225**

**PŘÍLOHA IV: LINEARIZACE TAHOVÝCH KŘIVEK 2500\_224**

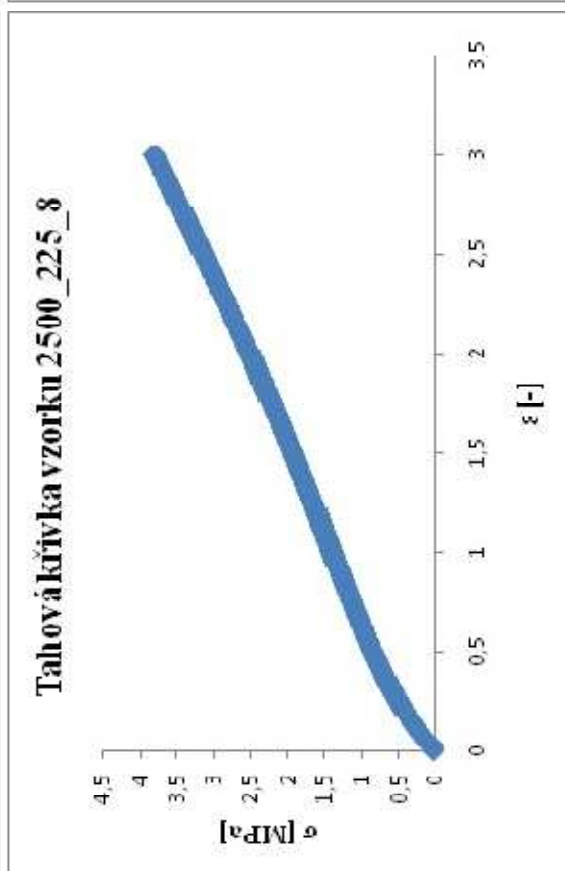
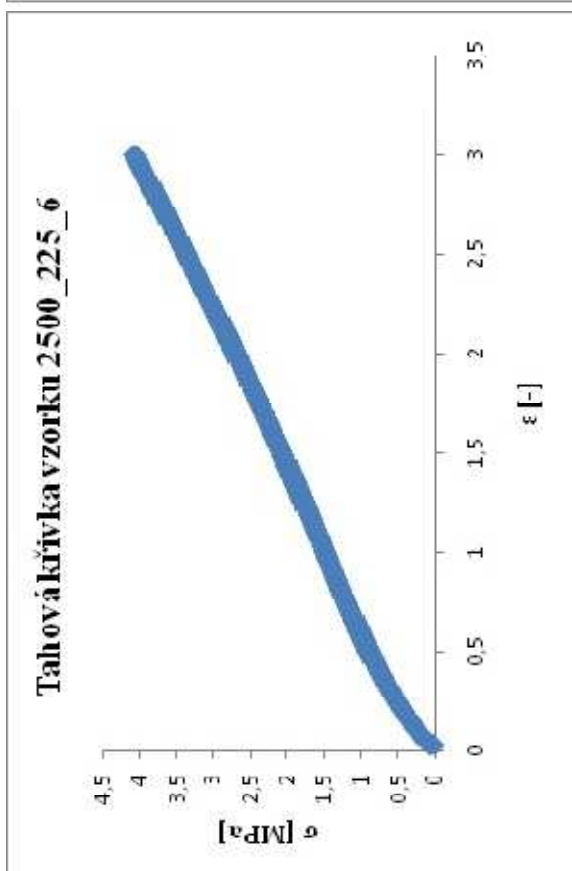
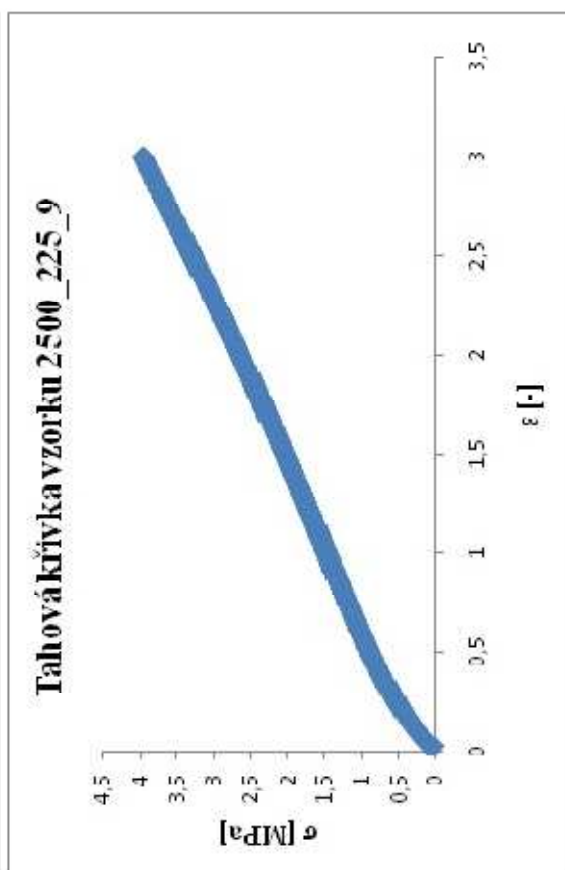
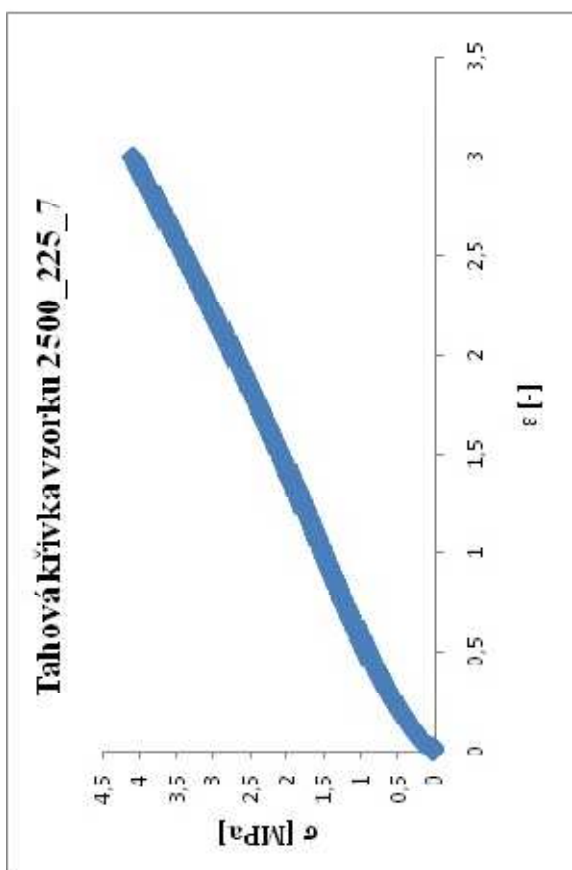
**PŘÍLOHA PV: VSTUPNÍ MATERIÁLOVÉ DATA PRO SMĚS  
2500\_225**

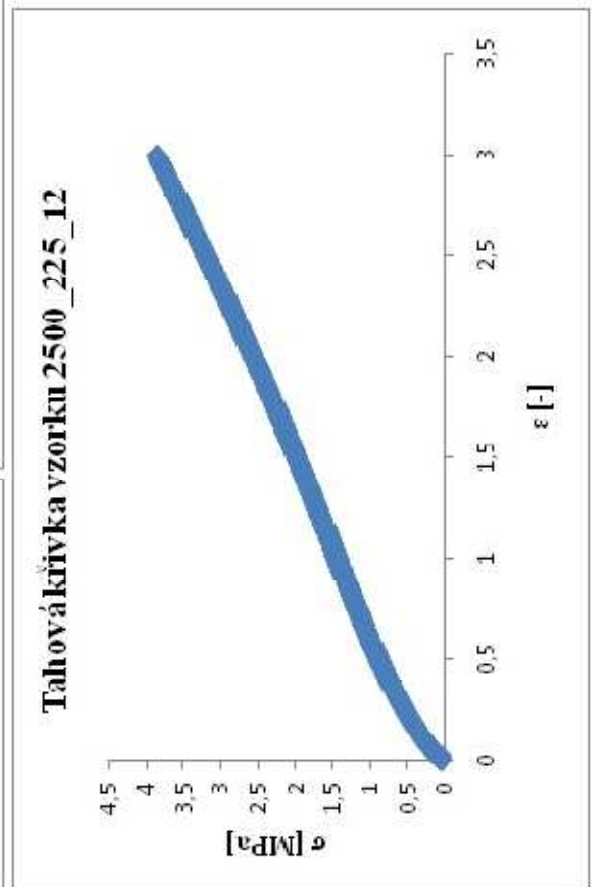
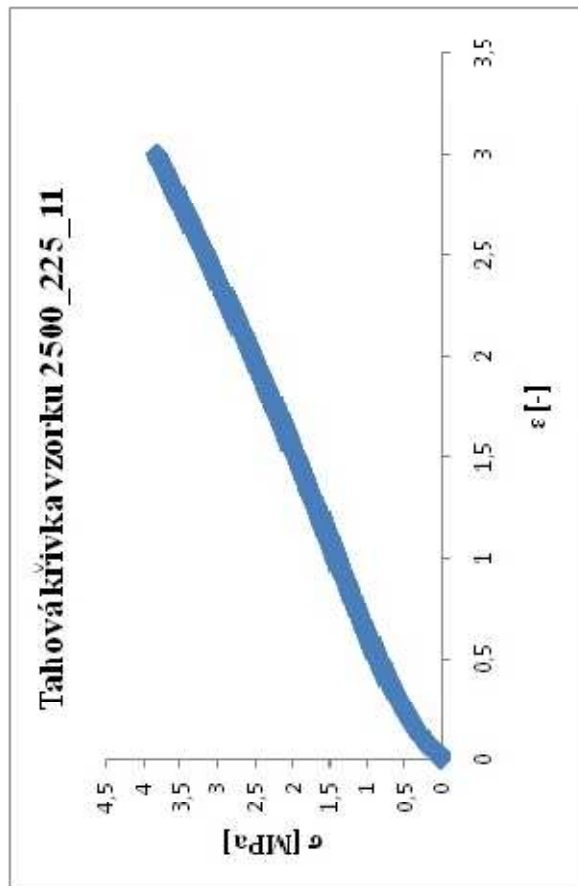
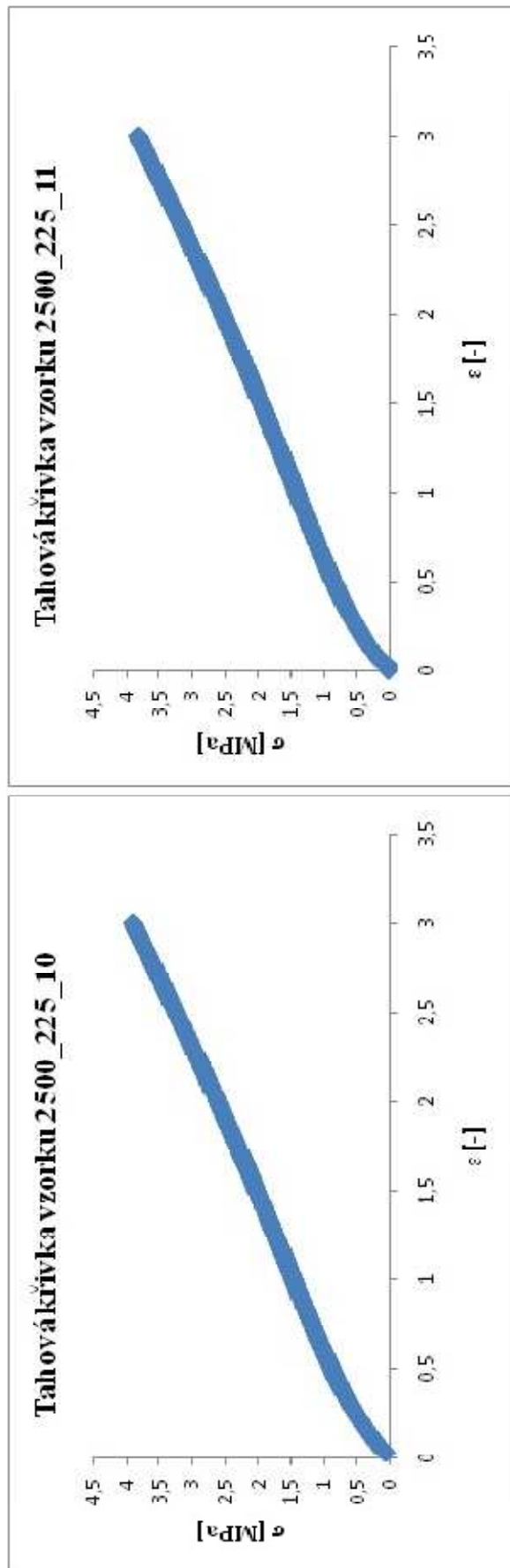
**PŘÍLOHA PVI: VSTUPNÍ MATERIÁLOVÉ DATA PRO SMĚS  
2500\_224**

## PŘÍLOHA PI: TAHOVÉ KŘIVKY PRO SMĚSI 2500\_225

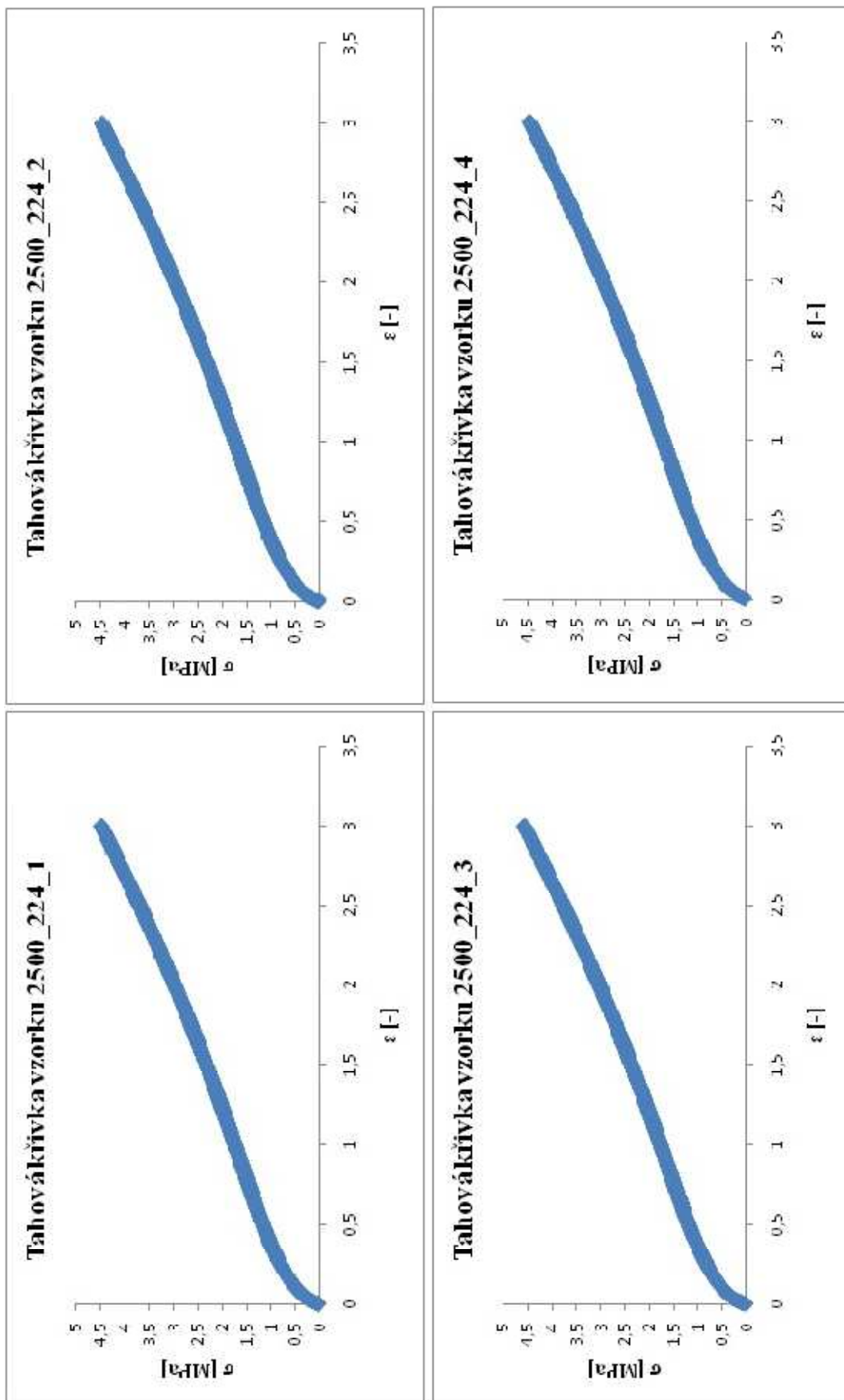


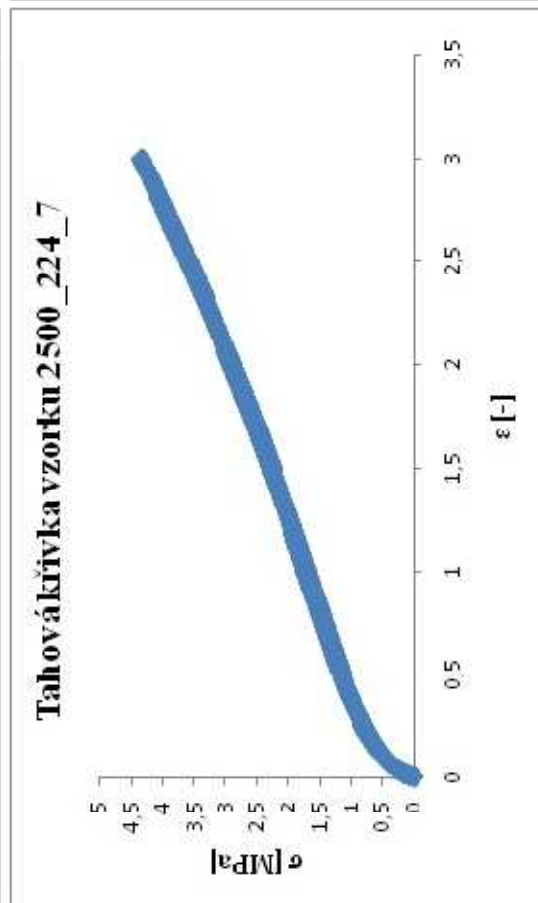
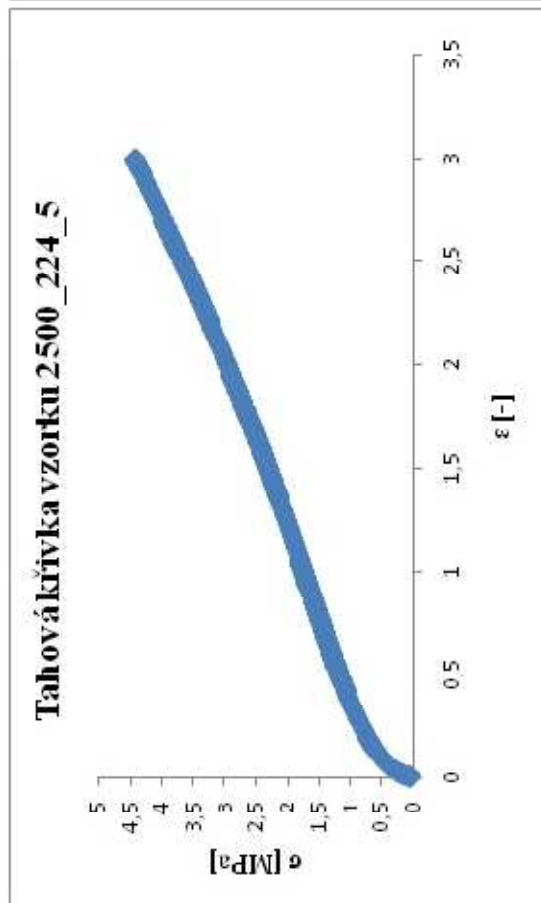
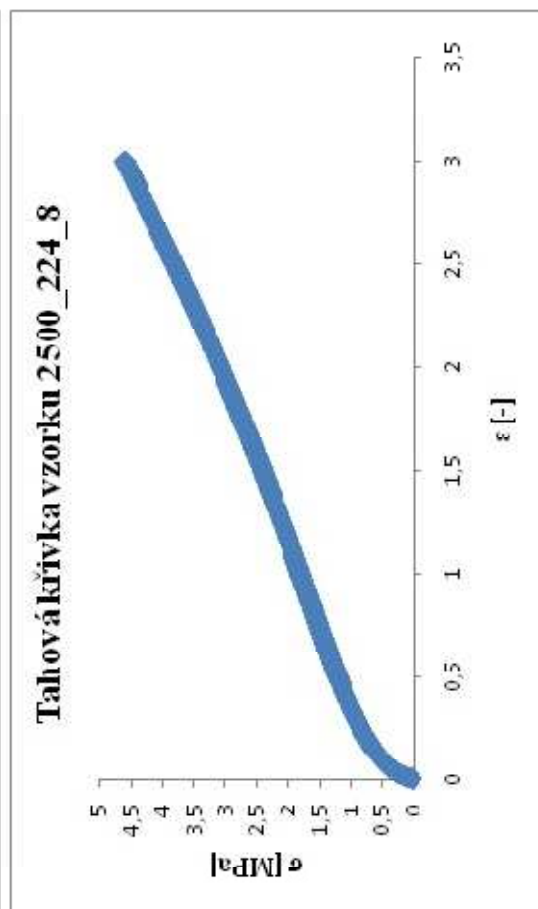
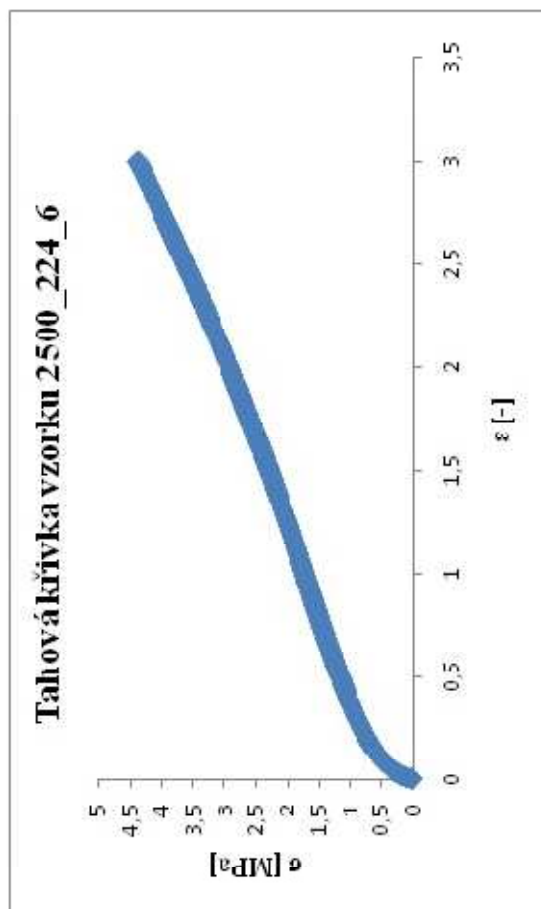


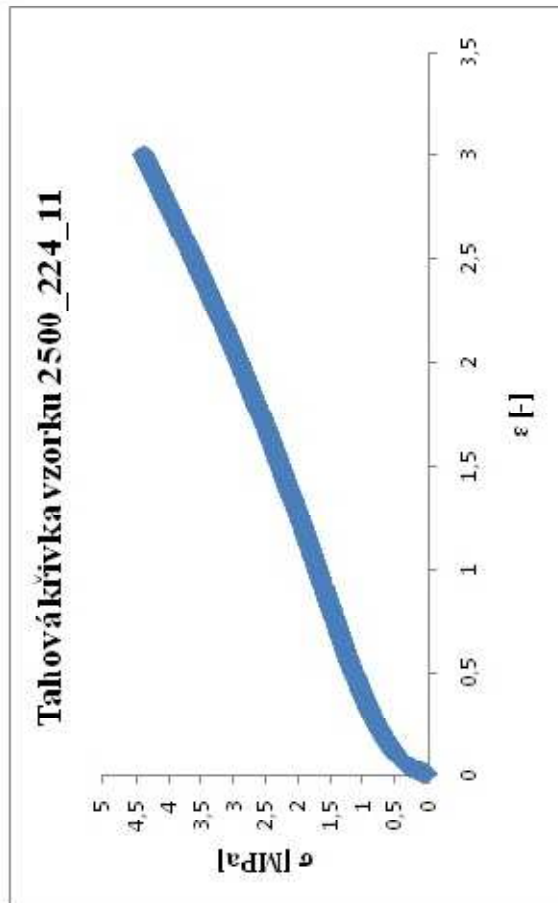
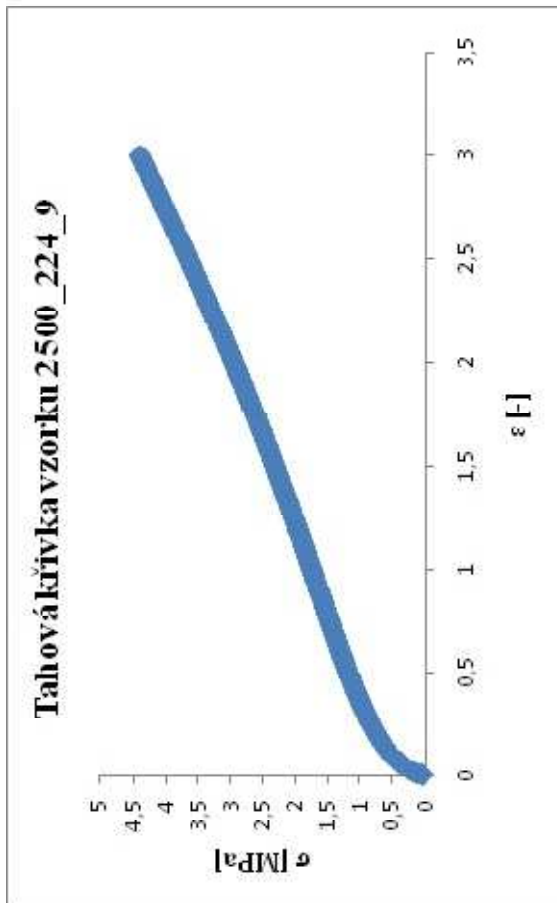
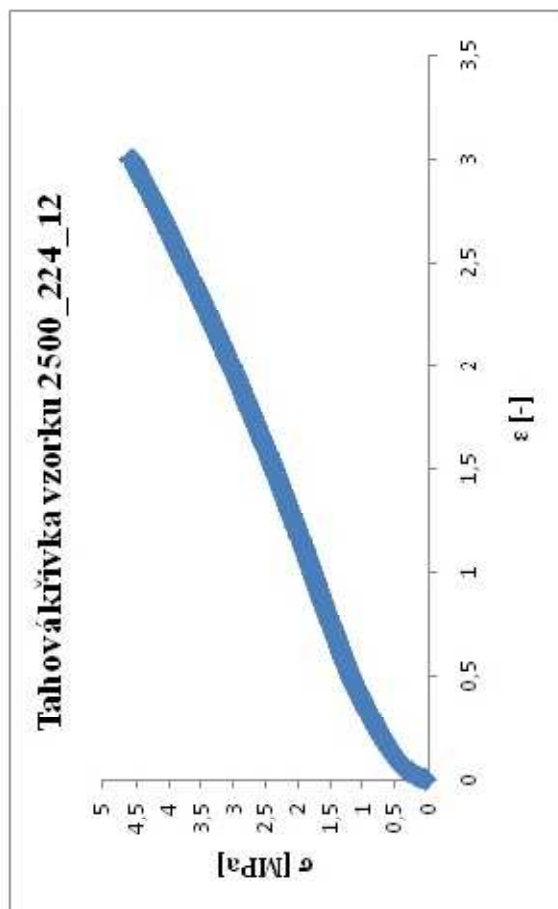
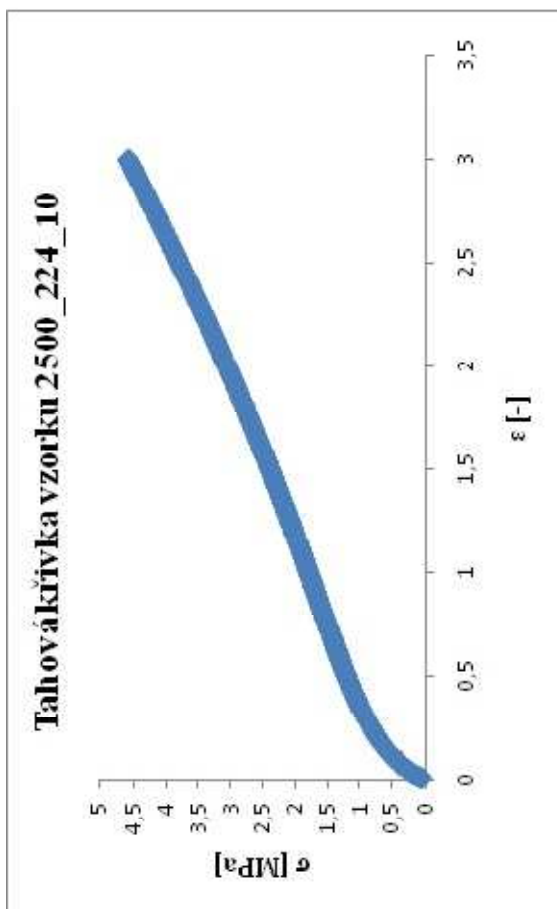




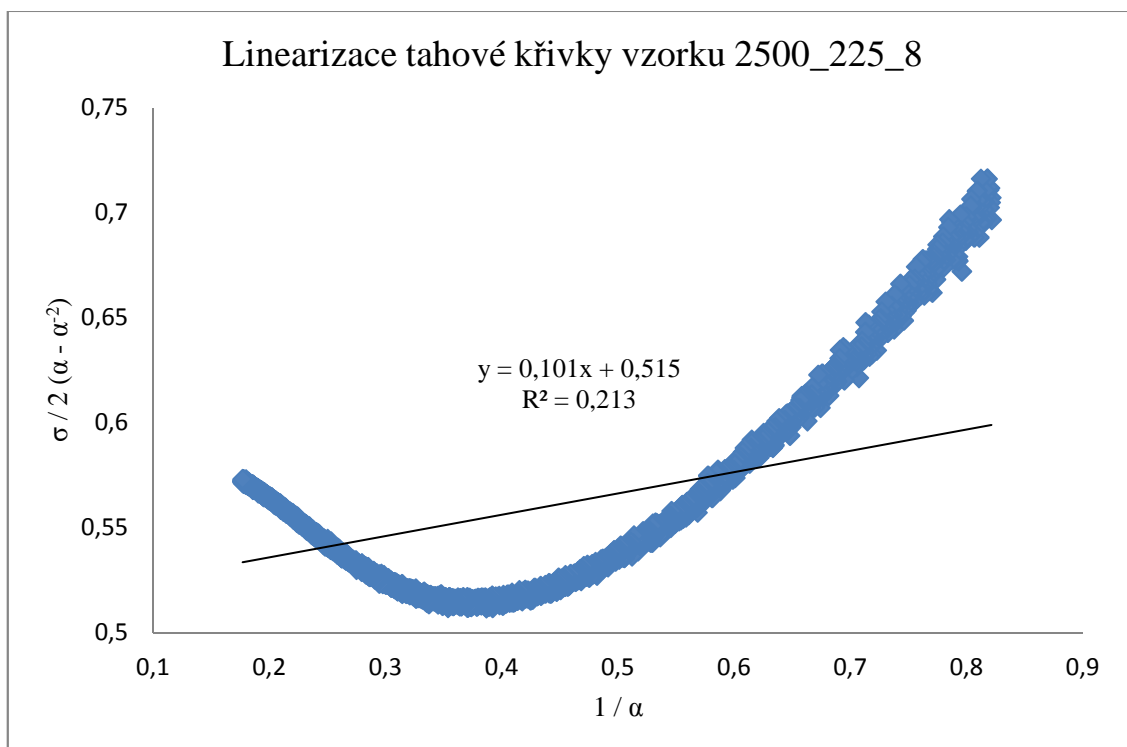
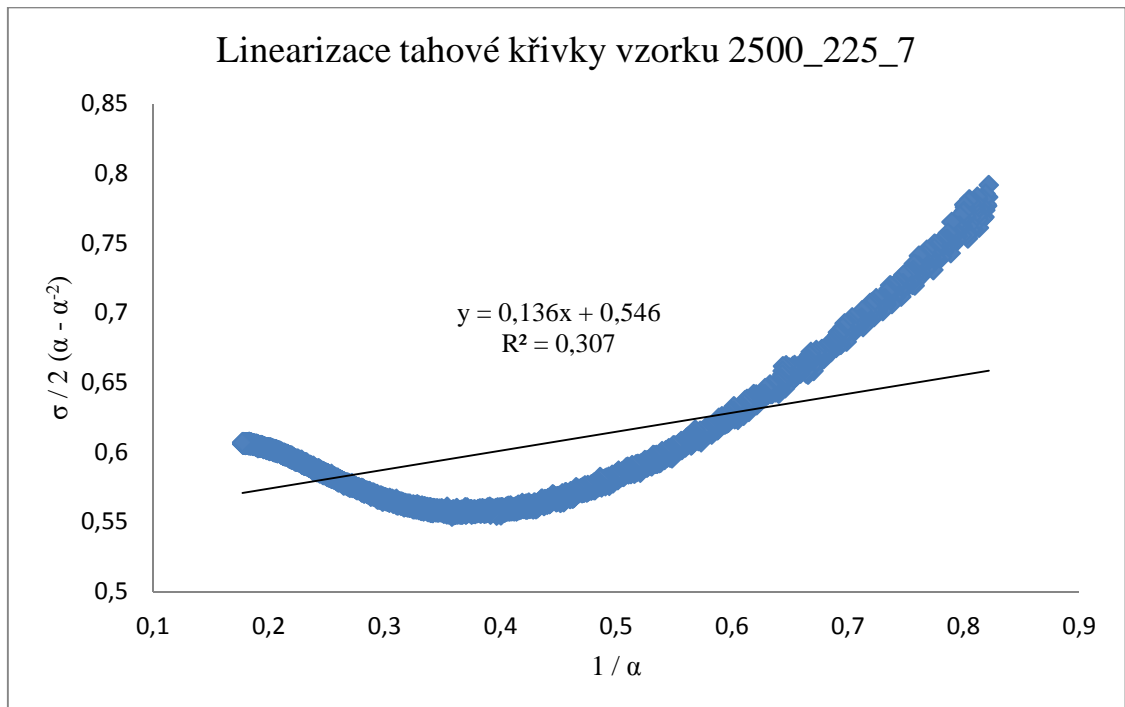
## PŘÍLOHA PII: TAHOVÉ KŘIVKY PRO SMĚSI 2500\_224

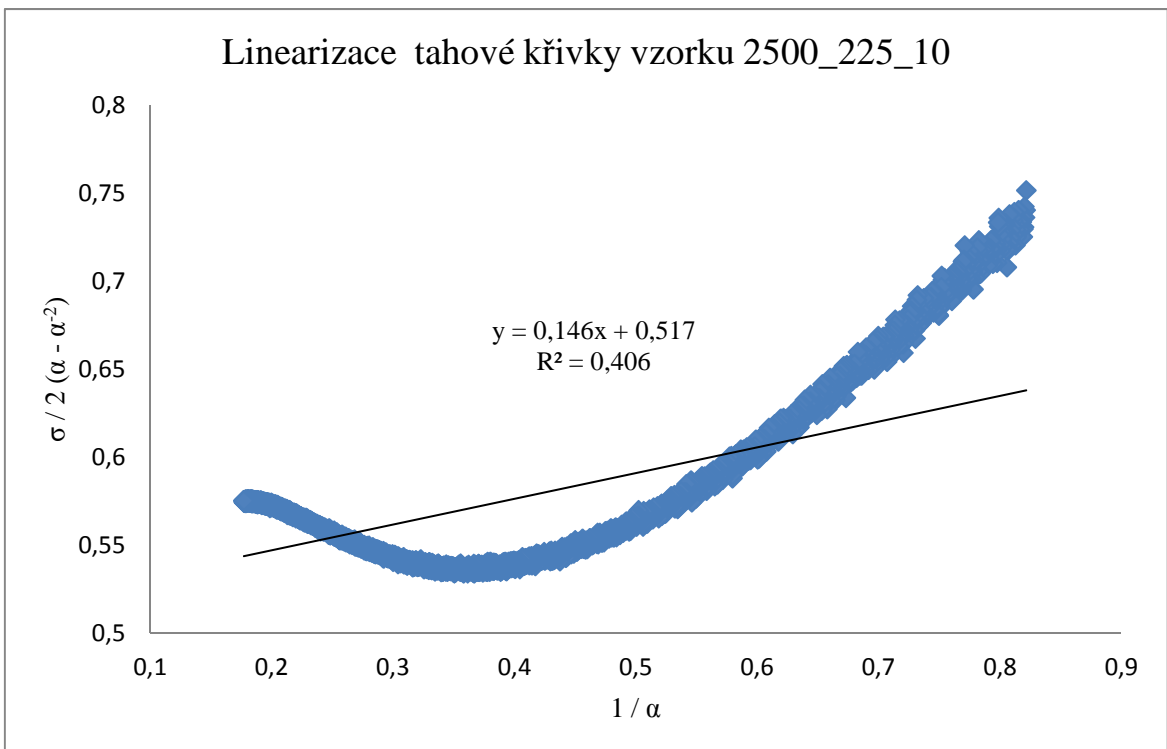
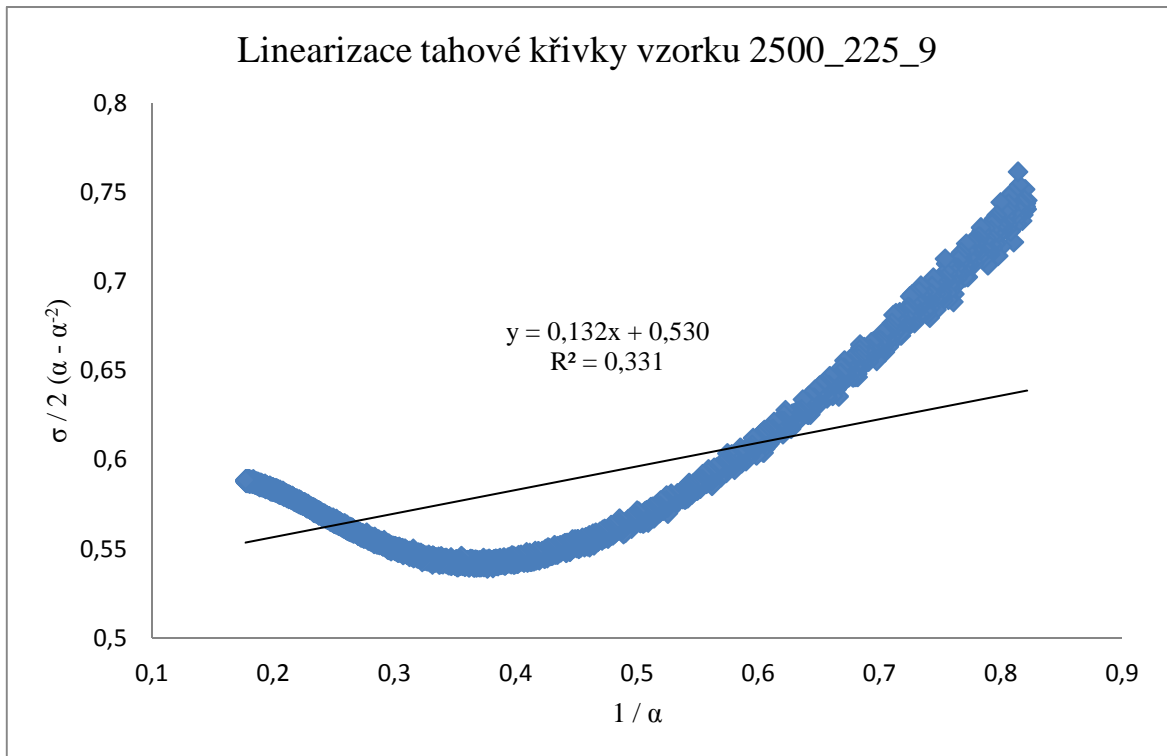


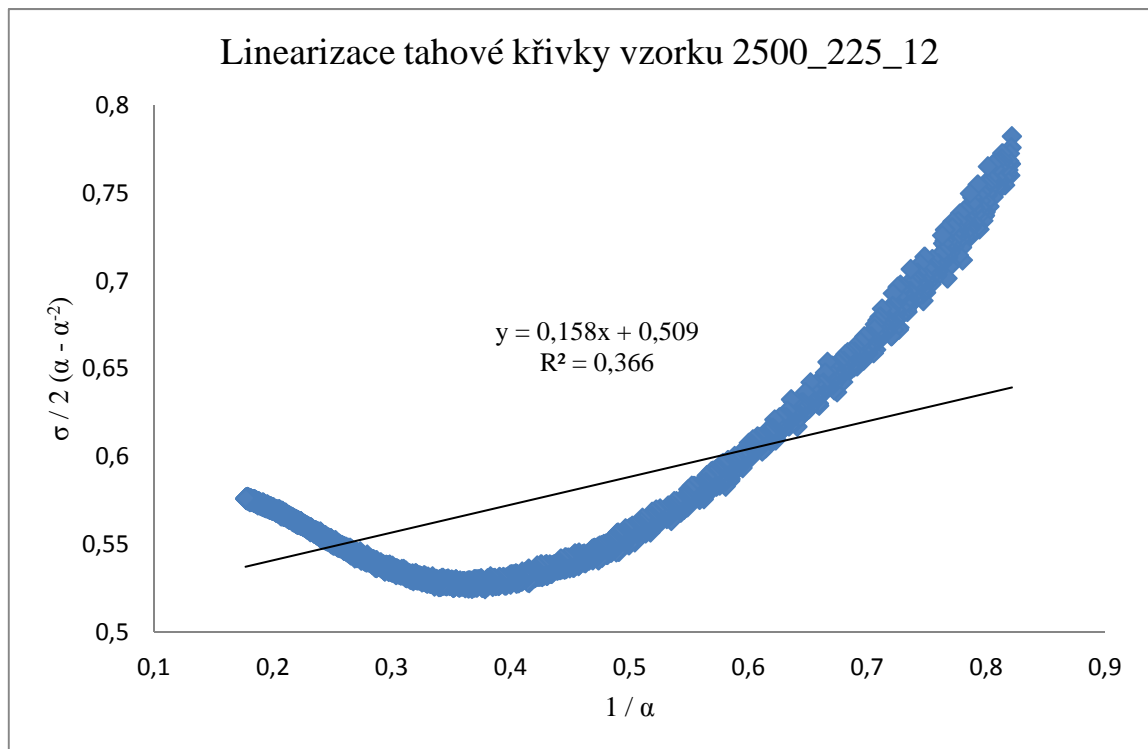
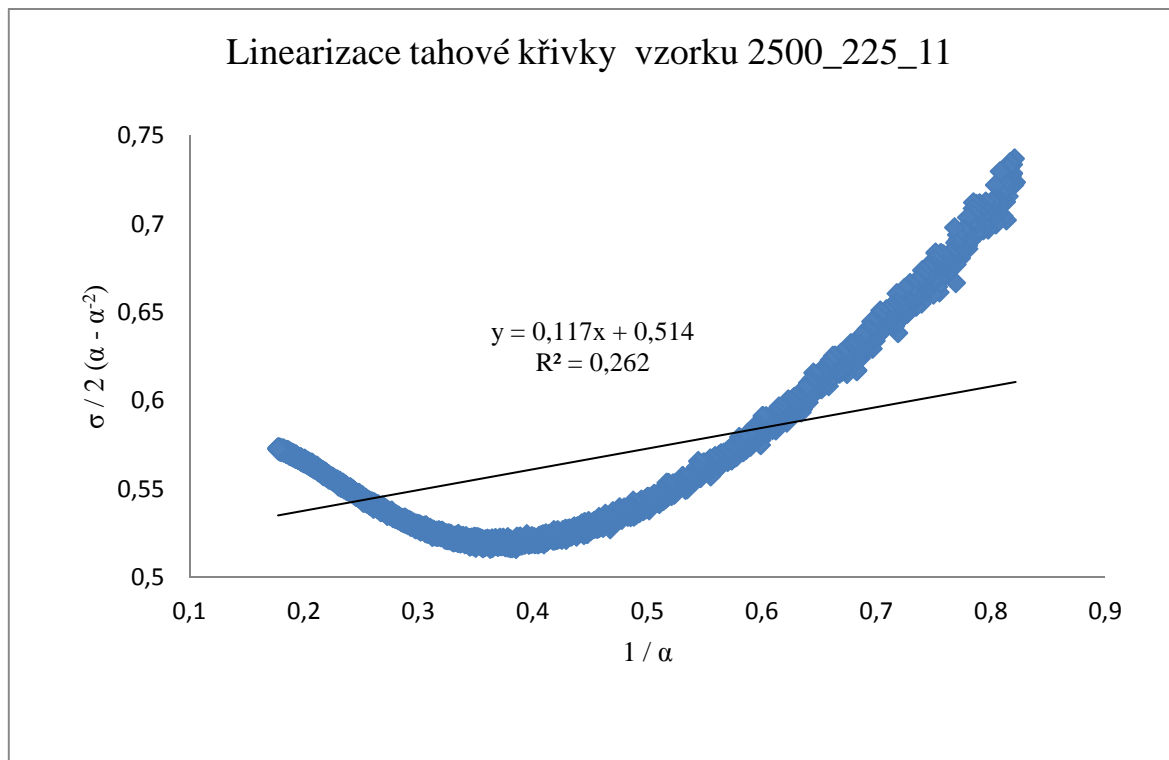




## PŘÍLOHA P III: LINEARIZACE TAHOVÝCH KŘÍVEK 2500\_225

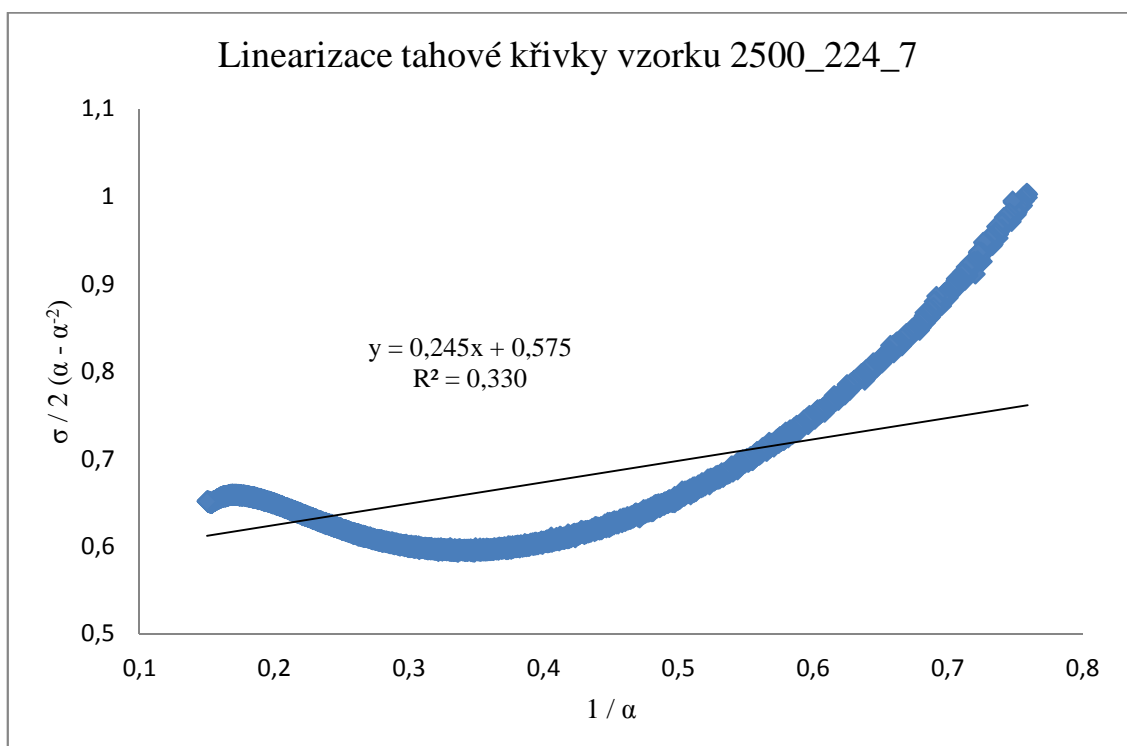
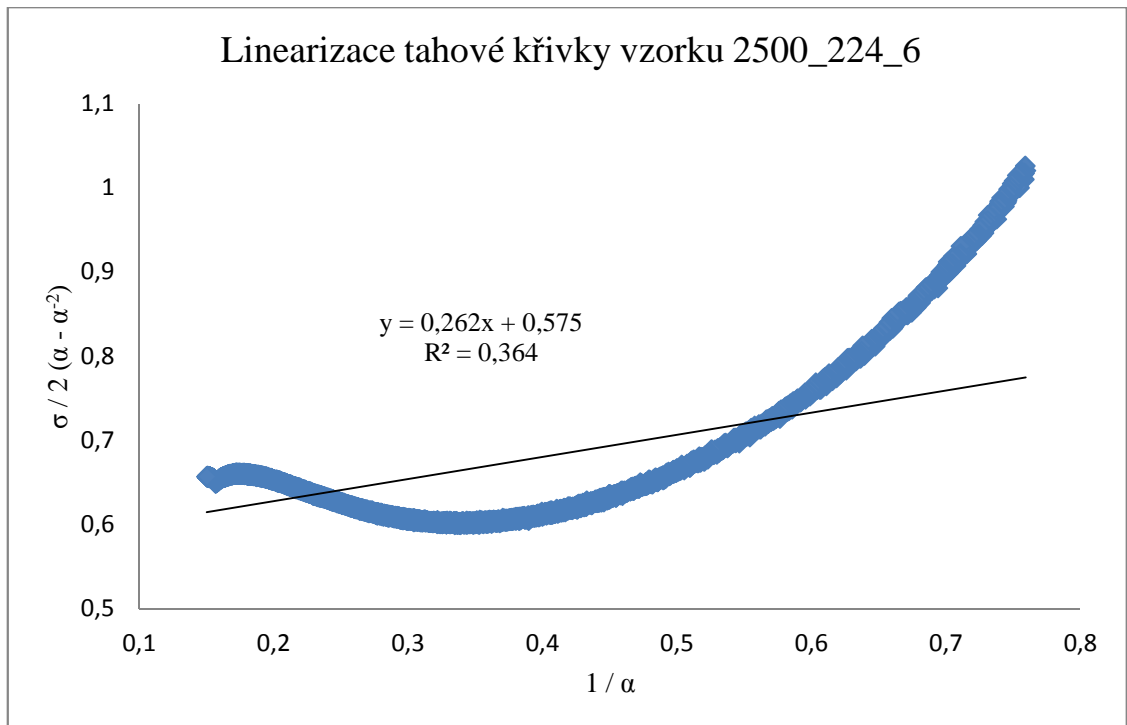


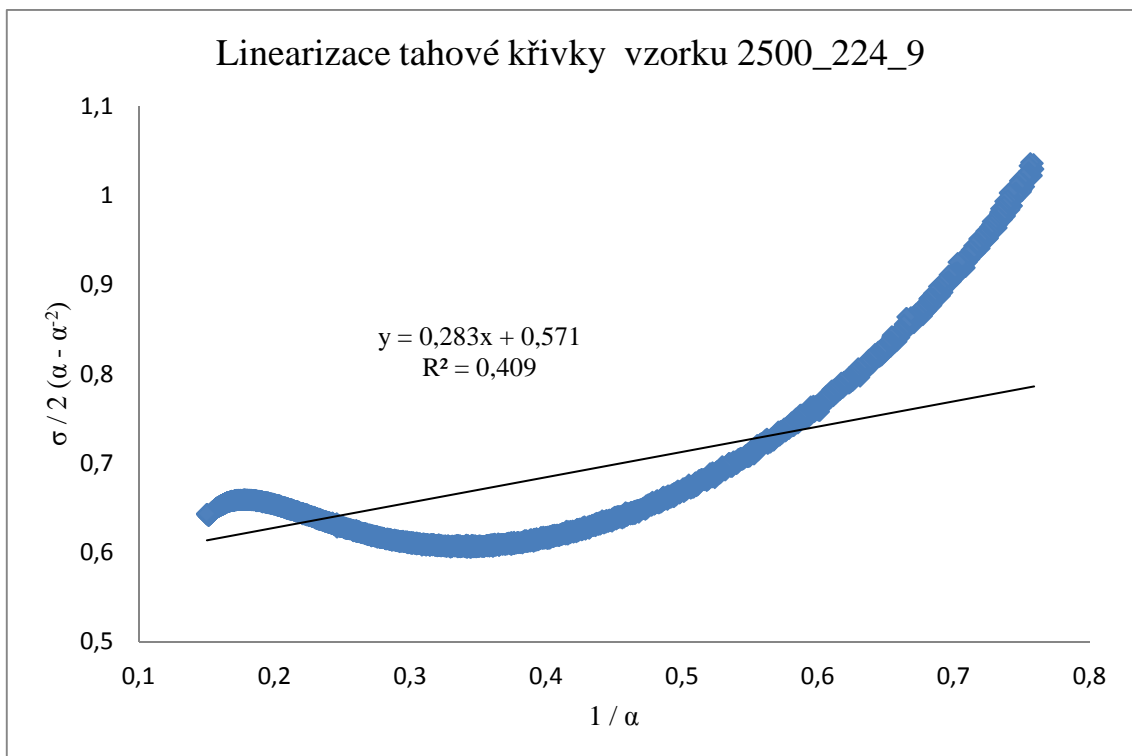
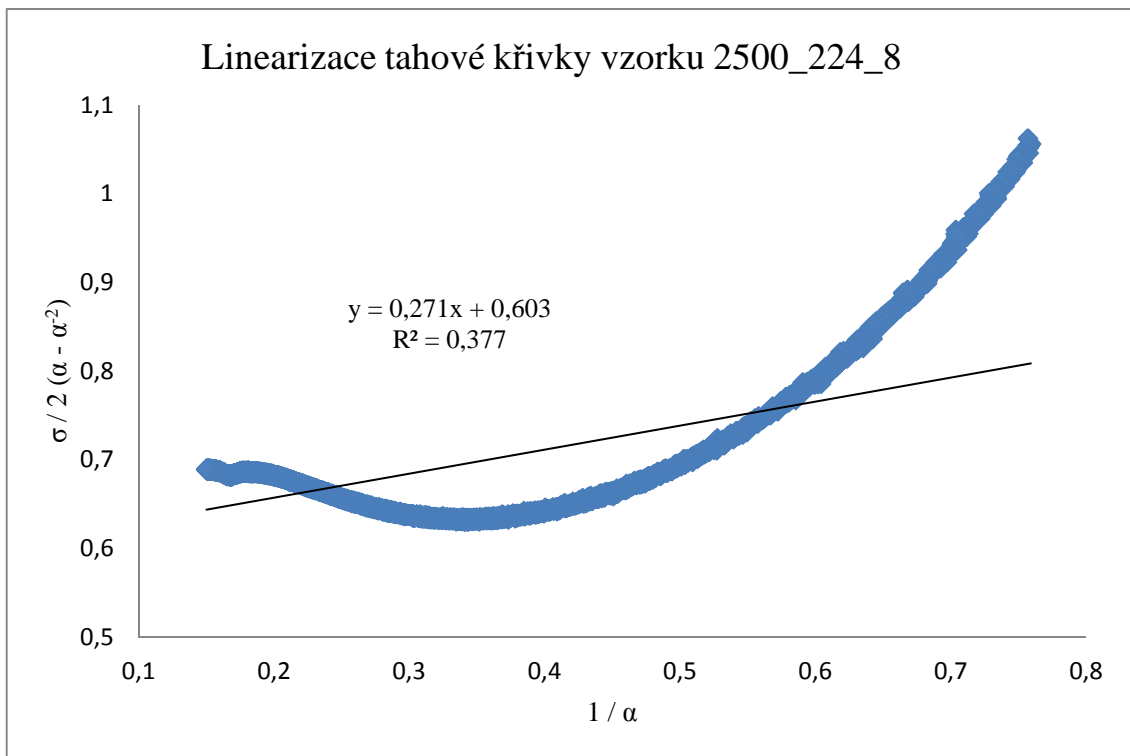


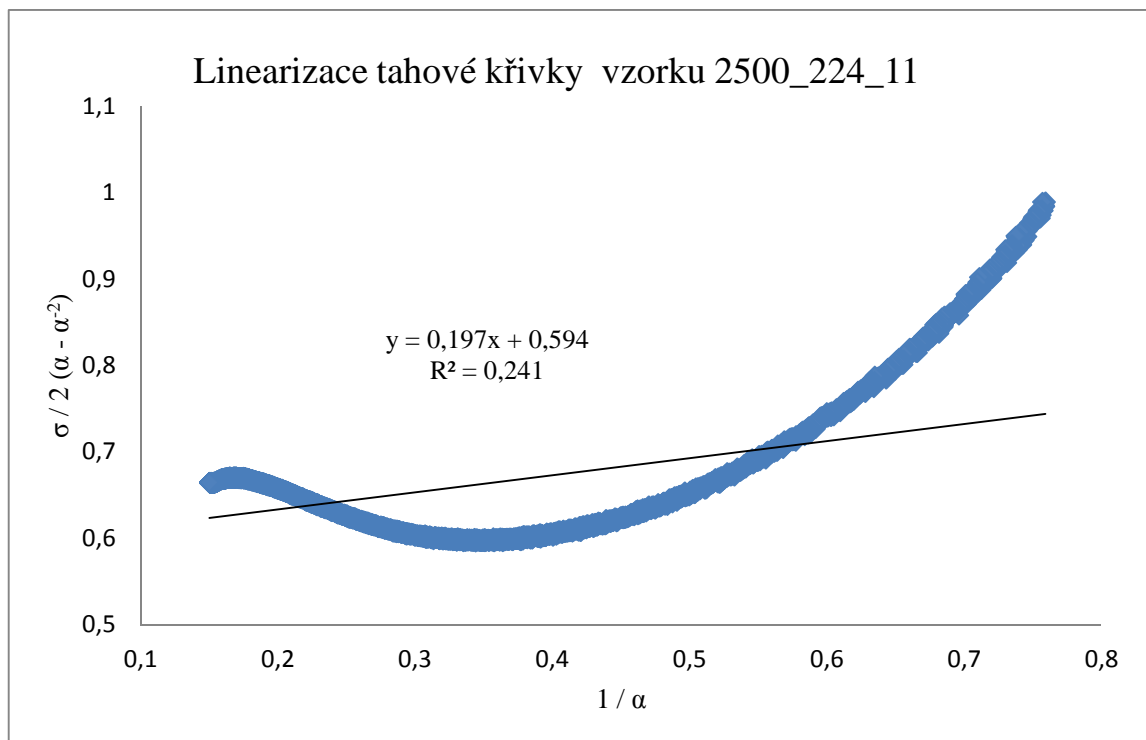
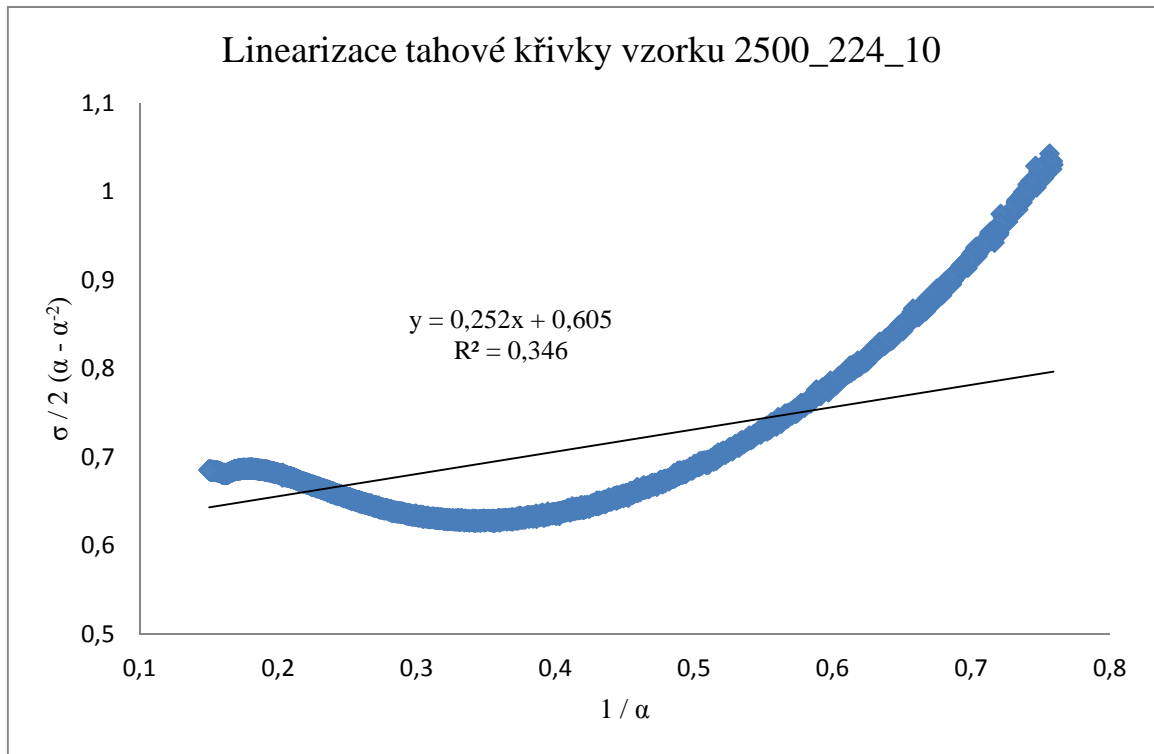


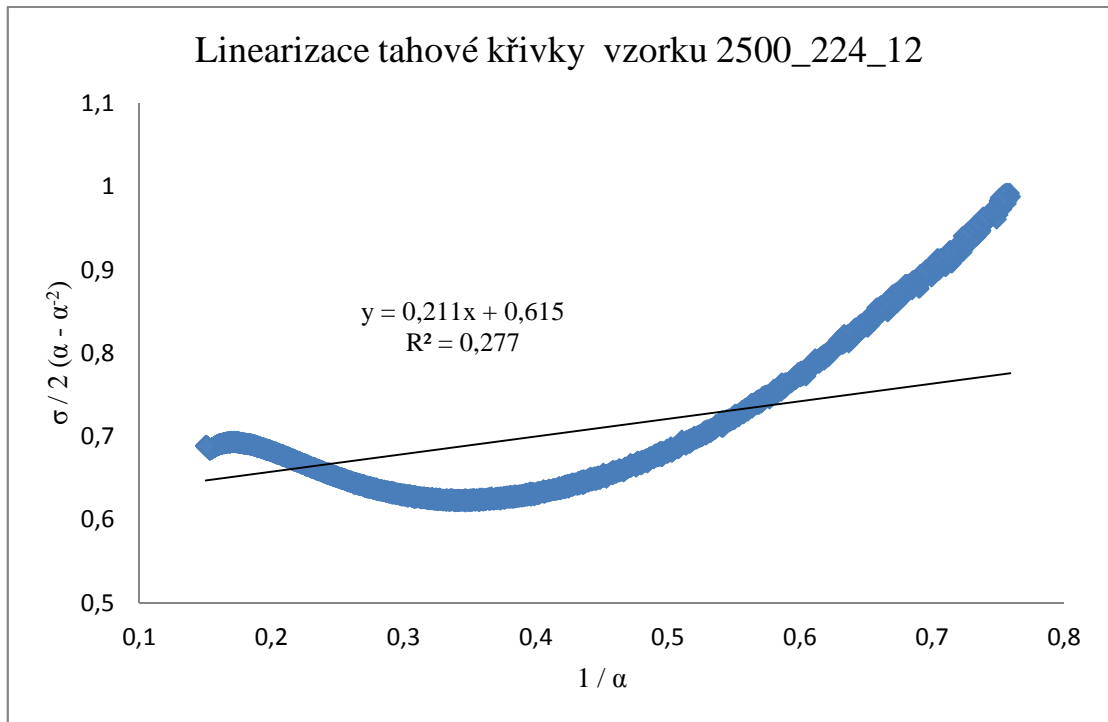


## PŘÍLOHA P IV: LINEARIZACE TAHOVÝCH KŘIVEK 2500\_224









## PŘÍLOHA PV: VSTUPNÍ MATERIÁLOVÉ DATA PRO SMĚS 2500\_225

### 1.3.1. MATERIAL NO 1 RUBBER

-----

#### HYPERELASTIC BEHAVIOR

##### MOONEY-RIVLIN LAW

COMPRESSIBILITY COEFFICIENT	BULK	=	1.0000E+06
INVARIANT COEFFICIENTS	MORI	=	5.2136E+02
		=	1.1191E+02
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00

#### PROPERTIES AT THE ORIGIN

YOUNG MODULUS	=	3.7980E+03
POISSON RATIO	=	4.9937E-01
SHEAR MODULUS	=	1.2665E+03

#### GENERAL DATA

VOLUMIC MASS	M	=	1.1000E-06
THERMAL EXPANSION COEFFICIENT	A	=	Undefined
KIRCHHOFF STRESS MEASURE			
REFERENCE TEMPERATURE.(.MAT.)	TREF	=	Undefined
taken equal to .GEL temperature = 0.0000E+00			

## 1.3.2. MATERIAL NO 2 STEEL

-----

## LINEAR ELASTIC BEHAVIOR

## ELASTIC PROPERTIES

ISOTROPIC YOUNG MODULUS YT = 2.0600E+08

POISSON COEFFICIENT NT = 3.0000E-01

## GENERAL DATA

VOLUMIC MASS M = 7.8500E-06

THERMAL EXPANSION COEFFICIENT A = Undefined

## KIRCHHOFF STRESS MEASURE

REFERENCE TEMPERATURE.(.MAT.) TREF= Undefined

taken equal to .GEL temperature = 0.0000E+00

## PŘÍLOHA PVI: VSTUPNÍ MATERIÁLOVÉ DATA PRO SMĚS 2500\_224

### 1.3.1. MATERIAL NO 1 RUBBER

-----

#### HYPERELASTIC BEHAVIOR

##### MOONEY-RIVLIN LAW

COMPRESSIBILITY COEFFICIENT.	BULK	=	1.0000E+06
INVARIANT COEFFICIENTS.	MORI	=	5.6625E+02
		=	2.6583E+02
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00
		=	0.0000E+00

#### PROPERTIES AT THE ORIGIN

YOUNG MODULUS	=	4.9897E+03
POISSON RATIO	=	4.9917E-01
SHEAR MODULU	=	1.6642E+03

#### GENERAL DATA

VOLUMIC MASS	M	=	1.1000E-06
THERMAL EXPANSION COEFFICIENT	A	=	Undefined
KIRCHHOFF STRESS MEASURE			
REFERENCE TEMPERATURE.(.MAT.)	TREF	=	Undefined
taken equal to .GEL temperature = 0.0000E+00			

## 1.3.2. MATERIAL NO 2 STEEL

-----

## LINEAR ELASTIC BEHAVIOR

## ELASTIC PROPERTIES

ISOTROPIC YOUNG MODULUS YT = 2.0600E+08

POISSON COEFFICIENT NT = 3.0000E-01

## GENERAL DATA

VOLUMIC MASS M = 7.8500E-06

THERMAL EXPANSION COEFFICIENT A = Undefined

## KIRCHHOFF STRESS MEASURE

REFERENCE TEMPERATURE.(.MAT.) TREF= Undefined

taken equal to .GEL temperature = 0.0000E+00