

Vliv materiálových charakteristik hyperelastických materiálů na tlumicí

The impact of the material characteristics of hyperelastic
materials on damping properties
vlastnosti

Nevařil Pavel

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta Technologická

Vložit oficiální zadání diplomové/bakalářské práce

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Antonínu Poláškov, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při řešení a zpracování zadaného tématu.

Rovněž bych chtěl poděkovat vedení společnosti Barum Continental spol. s.r.o. za poskytnutí vzorků a spolupráci při měření této práce, Ing. Martinu Mušínskému za ochotu a odborné rady při měření a společnosti K.P.R. ENGINEERING, s.r.o. za poskytnutí softwarového vybavení pro práci.

Tato diplomová práce o názvu Vliv materiálových charakteristik hyperelastických materiálů na tlumicí vlastnosti byla vypracována na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za pomoci finančního zabezpečení této instituce. Je proto jejím majetkem a jakékoliv údaje v této diplomové práci obsažené mohou být využity literárně, technicky a technologicky jen po společném souhlasu ředitele uvedeného ústavu a vedoucího diplomové práce. V případě publikování výsledků v odborných časopisech budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 05. 07. 2005

.....

jméno diplomanta

RESUMÉ

Cílem této diplomové práce bylo zjistit materiálové charakteristiky pryžových vzorků01-04 a vyhodnotit jejich tlumicí vlastnosti. Materiálové charakteristiky vzorků01-04 byly zjištěny experimentálním měřením standardními metodami. Tím byly získány potřebné hyperelastické materiálové parametry a konstanty, které jsou charakteristické pro jednotlivé pryžové vzorky.

Následoval návrh modelu tlumiče, aplikace získaných materiálových charakteristik na model tlumiče, numerické řešení modelu pomocí MKP a simulace chování tlumiče. Tvar tlumiče byl navržen pro tlumení vibrací silou lineárně rozloženou v horní části tlumiče podle zadaného požadavku .

Získané výsledky deformačních a napěťových veličin na všech modelových vzorcích vykazují velmi dobrou relevanci a shodu s parametry zadání.

The main aim of my master thesis was to find out the material characteristics of rubber samples01-04 and analyze their damping behaviour. The material characteristics for samples01-04 were obtained by experimental measurement of standard methods. Then we got the required hyperelastic material parameters and constants that are distinctive for every rubber sample.

Damper model creation was followed by application of acquired material characteristics on damper model, numerical model solution FEM and simulation of damper behaviours. The damper shape was designed for damping vibrations for the line linear distribution force decomposed in upper part of the damper according to a given requirement.

Acquired results of deformations and stresses on all model samples show very good relevance and are in accordance with task parameters.

OBSAH

ÚVOD.....	6
1TEORETICKÁ ČÁST.....	7
1.1KAUČUK.....	7
1.1.1Základní druhy kaučuku.....	7
1.2ELASTOMERY.....	7
1.2.1Přez a její třídění.....	8
1.2.2Všeobecné vlastnosti přez.....	10
1.3ZKUŠEBNICTVÍ.....	11
1.3.1Stanovení fyzikálně-mechanických vlastností.....	12
1.3.2Stanovení tahových vlastností.....	12
1.3.3Stanovení tvrdosti.....	15
1.3.4Stanovení odrazové pružnosti.....	17
1.4FUNKCE DEFORMAČNÍ ENERGIE PRO IZOTROPNÍ MATERIÁLY.....	18
2STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	21
3EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	22
3.1PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	22
3.1.1Zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek.....	22
3.1.2Zkušební tělesa ve tvaru kotouče.....	23
3.2TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	24
3.3TVRDOST SHORE A.....	27
3.4ODRAZOVÁ PRUŽNOST NA PŘÍSTROJI SCHOB.....	28
3.5VÝPOČET MODULŮ Z NASTAVITELNÝCH PARAMETRŮ.....	29
3.6SESTROJENÍ MODELU TLUMIČE.....	32
3.6.1Návrh konstrukce základní geometrie tlumiče.....	32
3.6.2Aplikace metody konečných prvků (MKP) pro analýzu tlumiče.....	33
3.6.3Deformační energie pro hyperelastický izotropní materiál.....	36
3.6.4Okrajové podmínky a zatížení tlumiče.....	38
3.6.5Zobrazení a časový průběh deformací navrženého tlumiče.....	39
4DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	47
4.1MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY.....	47
4.1.1Tahová zkouška.....	47
4.1.2Tvrdost Shore A.....	47
4.1.3Odrazová pružnost Schob.....	48
4.2DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ.....	48
ZÁVĚR:.....	50
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	54
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	57
SEZNAM TABULEK.....	59

ÚVOD

Kaučukových výrobků se dnes využívá pro jejich výhodné vlastnosti ve velkém množství ve všech oborech. Vynikají dobrými elektroizolačními vlastnostmi, malou vodivostí, nepropouštějí plyny a speciální druhy odolávají mnoha chemickým vlivům. Nejcennější je však jejich elastičnost, pro niž je kaučuk nenahraditelný při výrobě pneumatik, dopravních pásů, těsnění, tlumičů apod. [0].

Reakcí nazývanou vulkanizace přechází kaučuk resp. kaučuková směs na hyperelastický materiál - pryž. Hlavní vlastnosti pryže jsou ovlivněny jejím chemickým složením.

Mechanické vlastnosti pryže jsou charakterizovány zejména dvěma podstatnými vlastnostmi, a to je stlačitelností a schopností dosahovat velkých deformací při vzniku relativně malých napětí. Dosahují největšího poměrného prodloužení až 800% a závislost síly na poměrném prodloužení je výrazně nelineární. I když všechny skutečné materiály jsou stlačitelné, lze pryže jejichž poměr objemového modulu ku modulu ve smyku je několikanásobně vyššího řádu, považovat ve většině případů za nestlačitelné [0].

V této práci se používá fenomenologický přístup k popisu mechanických vlastností pryže, který není založen na molekulární struktuře, ale čistě na matematickém modelu. Jeden z prvních modelů publikoval Hencky na začátku 30 let minulého století. Asi o deset let publikoval Mooney model se dvěma parametry založený na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během smykové deformace. V padesátých letech minulého století Rivlin modifikoval Mooneyův model a vyjádřil funkci deformační energie pomocí invariantů deformace. Později Treolar publikoval model založený na statistice, nazývaný Neo-Hookeovský. Tento model je definován pouze jedním parametrem a je zvláštním případem Mooneyova modelu. V roce 1972 Ogden publikoval funkci deformační energie vyjádřenou v závislosti na hlavním protažení, která hyperelastické materiály popisuje velmi výstižně. Identifikace parametrů modelu však zpravidla vyžaduje více než jeden druh experimentů [0].

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Kaučuk

Kaučuk byl dovezen do Evropy před více než 200 lety, ale technicky významným materiálem se stává až po objevení vulkanizace Charlesem Goodyearem v roce 1839. Postupně pronikal do všech oblastí lidské činnosti a nacházel stále větší uplatnění. Největší vliv na rozmach a vývoj kaučuku měl v roce 1888 Dunlopův vynález pneumatiky a s tím spojený automobilový průmysl. Dnes je kaučuk nepostradatelný materiál, jehož nedostatek by ohrozil soudobou techniku a mnohé vymoženosti moderního života vůbec [0],[0].

Kaučuk patří všeobecně do skupiny polymerů se specifickými a unikátními vlastnostmi, které je ve skupině gumárenských surovin a materiálů řadí na přední místo objemu použití. Pod pojmem kaučuk se v minulosti rozuměl přírodní kaučuk, vývoj a výroba syntetických kaučuků přinesli nutnost tento pojem zevšeobecnit. Kaučuk je nezesíťovaný, ale síťovatelný (vulkanizovatelný) polymer s vysokoelastickými vlastnostmi při pokojové teplotě a za určitých podmínek i nad touto teplotou. Při vyšších teplotách a působením deformačních sil má kaučuk zvýšený viskózní tok, takže za vhodných podmínek může být zpracovatelný do požadovaného tvaru. Kaučuk je výchozí materiál pro výrobu elastomerů [0].

1.1.1 Základní druhy kaučuku

Základní dělení kaučuku je na přírodní a syntetické kaučuky. V současné době si přírodní a syntetické kaučuky v mnohých oborech navzájem konkurují, v mnohých případech se však účelně doplňují [0],[0].

Přírodní kaučuk, získávaný těžbou především ze stromu *Havea brasiliensis*, patří stále mezi nejvýznamnější kaučuky. Podíl přírodního kaučuku na celkové spotřebě kaučuku je 30 až 35 %. Průmyslově vyráběných syntetických kaučuků je velký počet. Liší se druhem monomeru, jejich poměrem při kopolymeraci, způsobem a podmínkami polymerace, druhem použitého katalyzátoru, emulgátoru, stabilizátoru. Tyto faktory ovlivňují výsledné vlastnosti kaučuku.

1.2 Elastomery

Vulkanizací přechází kaučuk ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického a mění se na elastomer (pojem vulkanizát resp. pryž je rovnícný).

Elastomery jsou až do teploty rozkladu zesíťené (vulkanizované) polymerní látky, které jsou při nízkých teplotách sklovitě tvrdé a při vysokých teplotách nemají viskózní tok, ale se, obzvláště při pokojové teplotě, chovají vysoce elasticky (hyperelasticky).

Vysoce elastické chování je charakteristické relativně nízkým modulem ve smyku s relativně malou závislostí na teplotě [0].

1.2.1 Pryž a její třídění

K orientačnímu roztrídění pryží slouží údaje základních vlastností, ze něž bývá často dodnes považována tvrdost, pevnost, tažnost, elasticita, strukturní pevnost a hustota.

Reakcí se sírou, obvykle za zvýšených teplot, se mění kaučuk v elastický materiál - pryž. Tento pochod se nazývá vulkanizace a je doprovázen změnami původních vlastností kaučuku nebo kaučukové směsi, ať to jsou vlastnosti chemické, tepelné, fyzikální, mechanické nebo elektrické. Na velikosti těchto změn má mimo jiné vliv především hmotnostní množství síry vázané na 100 hmotnostních dílů kaučuku, tzv. koeficient vulkanizace [0].

Změny vyvolané obsahem vázané síry umožňují vulkanizáty rozčlenit do tří skupin:

- ***Měkká pryž***

Zahrnuje většinu výrobků gumárenského průmyslu, např. pneumatiky, dopravní pásy, hadice a podstatnou část vlastní technické pryže.

Vulkanizační koeficient se pohybuje u těchto výrobků převážně mezi 2 až 3 % vázané síry. Vlastnosti vulkanizátu se mění podle složení směsi. Maximální pevnost dosahuje 25 až 30 N/mm², tažnost v průměru 400 až 600 %, tvrdost lze měnit v rozmezí 20 až 95 °Sh. Elastické vlastnosti jsou vysoké, rovněž odolnost proti dynamickému namáhání. Výrobky se vyznačují dobrou odolností proti stárnutí [0].

- ***Polotvrdá pryž***

Zahrnuje vulkanizáty s vulkanizačním koeficientem od 4 až 6 do 25 % vázané síry. Vulkanizáty běžných typů kaučuků mají špatné mechanické vlastnosti včetně odolnosti proti stárnutí. Odolnost proti dynamickému namáhání je nízká.

Postupný vzrůst tvrdosti, spojený s úbytkem tažnosti a elasticity, jim dodává kožovitého charakteru.

Pro všechny tyto nevýhodné vlastnosti mají výrobky z polotvrdé pryže jen omezené uplatnění v praxi [0].

- ***Tvrdá pryž***

Získává se vulkanizací kaučuku za přítomnosti ještě většího obsahu síry, takže vulkanizační koeficient se pohybuje nad 25 % vázané síry, přičemž jeho mezní obsah síry je dán druhem použitého kaučuku.

Vulkanizáty se vyznačují rohovitou konzistencí a k přesnějšímu stanovení jejich tvrdosti je již potřeba přístrojů používaných v metalurgii (stupnice tvrdosti podle Brinella). Pevnost v tahu mají podstatně větší než měkká pryž, tažnost však minimální. V důsledku vysokého obsahu vázané síry dochází k nasycení dvojných vazeb kaučukového uhlovodíku, což je provázeno velmi dobrou odolností proti stárnutí a podstatně zvýšenou odolností proti kyselinám, zásadám a ostatním chemikáliím. Jejich dalším charakteristickým znakem jsou výborné elektroizolační vlastnosti.

Nevýhodou výrobků z tvrdé pryže je omezená odolnost proti vyšší teplotě [0].

1.2.2 Všeobecné vlastnosti pryže

Pryž se v mnoha směrech liší od ostatních materiálů.

- Mechanické, chemické a dynamické vlastnosti pryží mají relativně velké rozptyly číselných hodnot.
- Pryž je použitelná v relativně úzkém teplotním intervalu.
- Vliv času na všechny její vlastnosti je poměrně velký.

Tyto vlastnosti jsou z hlediska použití nevýhodné. Jsou však víc než vyváženy četnými přednostmi, které učinily z pryže hledaný materiál s nejširším uplatněním. Jsou to zejména:

- Vysoká elasticita, tj. schopnost vrátit se po uvolnění napětí do původního tvaru.
- Schopnost snášet bez poškození relativně velké opakované deformace.
- Schopnost přeměňovat ve velké míře mechanickou energii v tepelnou (tlumení).
- Velká chemická stabilita, které je možno využívat k ochraně kovů a jiných materiálů proti účinkům koroze.
- Velmi dobré elektroizolační vlastnosti.
- Nepropustnost pro plyny a vodu.
- Vlastnosti pryže lze měnit v širokých mezích nejen skladbou směsí, ale i tvarem výrobku.

Kromě vyjmenovaných vlastností existují ještě další, které lze považovat buď za výhodné, nebo za nevýhodné podle konkrétního použití. Jako příklad můžeme uvést tepelnou a teplotní vodivost nebo botnání [0],[0].

Jako základní vlastnost pryže můžeme považovat elasticitu. Tato vlastnost se projevuje tím, že pryž lze poměrně malou silou deformovat v tahu, tlaku, ohybu, kroucení apod. v daleko větších mezích, než je obvyklé u kteréhokoliv materiálu. Po ustání vnější síly pryž rychle nabývá téměř beze zbytku rozměrů a tvarů, jaké měla před deformací. U některých pryží lze dosáhnout při tahovém namáhání až několikanásobného prodloužení. Podle kinetické teorie pružnosti jsou v pryži, na niž působí vnější síly, řetězové molekuly kaučuku ve zkrouceném, neuspořádaném stavu. Při působení vnější síly se řetězce rozvinují a napřimují a orientují se ve směru namáhání. Tím vznikají v materiálu vnitřní síly. Dlouhý řetěz má snahu vrátit se do původního stavu, do stavu s větší entropií.

Nutným předpokladem je takové uspořádání řetězců, aby jejich deformace vůbec byla možná a jejich články se mohly otáčet.

Charakter všech elastomerů je dán uspořádáním molekul a jejich vzájemnými reakcemi během deformace. Vlastnosti pryže se dále modifikují vznikem primárních vazeb mezi molekulami, tyto vazby vznikají při vulkanizaci. Kromě toho existují ještě mezi molekulami mezimolekulové neboli sekundární vazebné síly, závislé na teplotě [0].

Vlastnosti pryže jsou tedy určeny složením směsi, podmínkami vulkanizace a do i jisté míry i tvarem a rozměrem příslušného výrobku.

1.3 Zkušebnictví

Cílem zkušebnictví je vykonání samotných zkoušek surovin, polotovarů, materiálů a výrobků, posouzení shody jejich vlastností s požadavky stanovenými v normách a technických předpisech. Výsledkem tohoto procesu je dokumentování bezpečnosti výrobků z hlediska ochrany jeho zdraví, života, majetku a v neposlední řadě i životního prostředí.

Gumárenské zkušebnictví můžeme rozdělit na zkoušení gumárenských surovin, směsí a vulkanizátů. V této práci se budeme výhradně zabývat zkoušením vulkanizátů, především stanovením fyzikálně-mechanických vlastností [0].

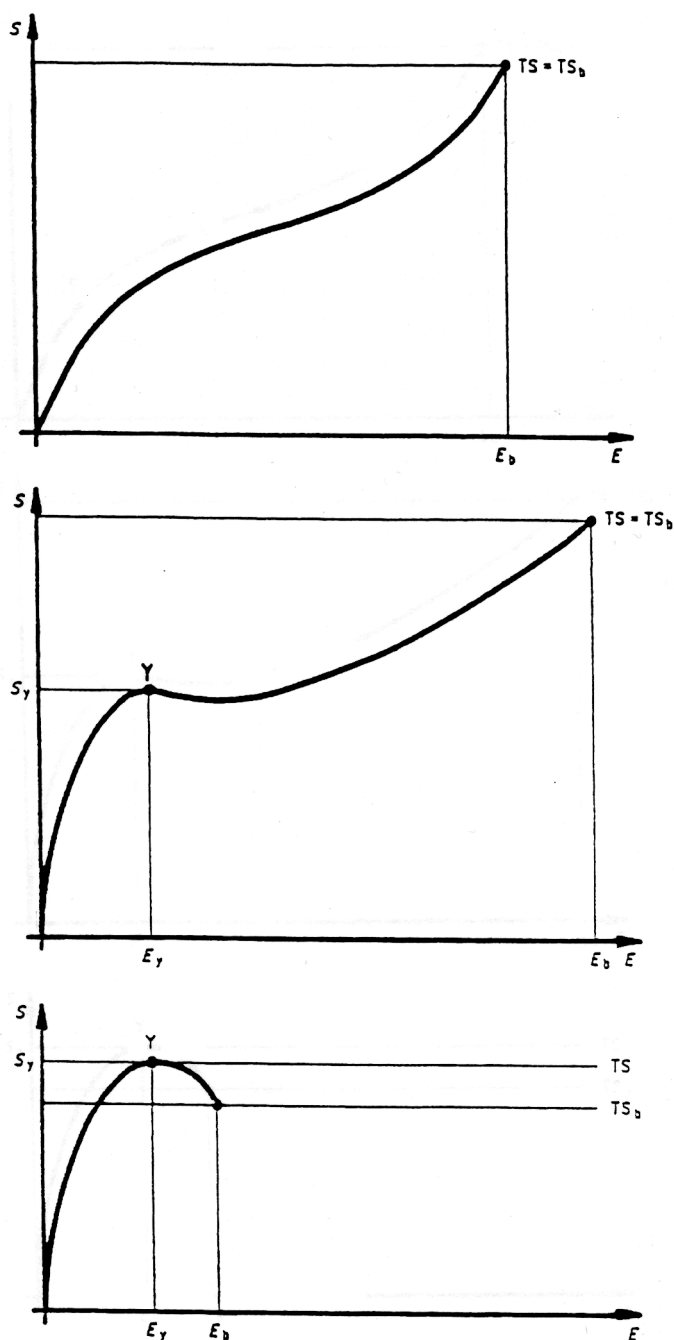
1.3.1 Stanovení fyzikálně-mechanických vlastností

Mezi základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vulkanizátů patří hustota, tahové vlastnosti (pevnost, tažnost, modul), tvrdost, odrazová pružnost, strukturní pevnost [0].

1.3.2 Stanovení tahových vlastností

Tahové zkoušky dávají orientační obraz o vlastnostech pryžového materiálu. Kromě toho se jejich pomocí kontroluje pravidelnost technologických procesů, např. kvalita míchání gumárenské směsi. Před zavedením reometrů do gumárenské praxe sloužili i na stanovení optima vulkanizace apod. Pro každou gumárenskou směs je závislost zatížení na prodloužení charakteristická. Grafickým vyjádřením této závislosti je tzv. tahová křivka.

Můžeme z ní zjistit maximální zatížení a prodloužení a taktéž zatížení potřebné na určité prodloužení – modul, který velmi často slouží jako míra hodnocení elastických vlastností vulkanizátů. Tento modul je totožný s Youngovým modulem pružnosti, který udává potřebné napětí na zdvojnásobení původní délky. Modul uváděný v gumárenské praxi pro určité prodloužení vyjadřuje vnitřní tuhost [0],[0].



Obr. 1. Grafické znázornění tahových křivek [0]

kde napětí v tahu S je napětí způsobující prodloužení zkušebního tělesa, E je prodloužení vzniklé působením napětí na zkušební těleso, pevnost v tahu TS je maximální napětí v tahu zaznamenávané při natahování zkušebního tělesa do okamžiku přetržení, TS_b je pevnost v tahu při přetržení zkušebního tělesa, E_b tažnost při přetržení, E_s prodloužení při daném napětí, pevnost na mezi kluzu S_y je tahové napětí v prvním bodě křivky napětí-deformace,

kde další růst deformace probíhá ve jakéhokoliv zvyšování napětí, E_y je prodloužení na mezi kluzu [0],[0].

Sledováním grafického záznamu závislosti napětí na prodloužení, můžeme zjistit, že jen při nepatrných zatíženích je tato závislost lineární (podle Hookova zákona), dále však se začíná pomale stáčet a na konci prudce stoupá, nastává ztužení pryže, které roste až do konečné destrukce vzorku.

Pevnost se stejně jako modul udává v přepočtu na původní průřez vzorku. Tento způsob se používá i přesto, že změna průřezu při tahové deformaci vzorku je velmi významná. Hlavní důvod je v tom, že změřit okamžitý průřez vzorku v momentě přetržení není jednoduché.

Dostatečná pevnost není všeobecnou zárukou vysoké kvality pryže. Neexistuje vztah mezi pevností v tahu a odolností proti mrazu, bobtnání, propustnosti plynů, nejasný je její vztah k odolnosti proti opotřebení, nejednoznačný k dynamickým vlastnostem. Hlavní chemický charakter pryže udává typ kaučuku. Ten do určité míry ovlivňuje fyzikálně-mechanické vlastnosti a i typ příčných vazeb. Příčné vazby mohou mít různou chemickou povahu a rozdílnou délku. Z tohoto důvodu je i pevnost příčných vazeb různá [0].

Kromě použitého kaučuku má na tahové vlastnosti pryže velký vliv dávkování plniv. Všechny plniva mění fyzikálně mechanické vlastnosti pryže a to zejména tvrdost, pevnost v tahu, modul a odolnost proti oděru. Pro plněné směsi je nejčastějším kritériem hodnota napětí při prodloužení o 300 % (modul 300 % nebo M_{300}). Tato hodnota není v celém rozsahu lineární funkcí koncentrace plniva, ale má parabolický tvar. Při malých koncentracích se mění málo, s vyšší koncentrací prudce stoupá.

Pevnost v tahu se stoupající koncentrací plniv z počátku roste, po dosažení určité maximální hodnoty opět klesá [0].

1.3.3 Stanovení tvrdosti

Měření tvrdosti je založené na měření hloubky vniknutí hrotu s definovanými rozměry do materiálu. Teoreticky platí, že odolnost pryže proti vtlačení je závislá při malých deformacích na hodnotě modulu pružnosti, rozměru zkušebního tělíska a rozměru vtlačeného tělesa. Pro válcovitý indentor je hodnota vtlačení úměrná zatížení a nepřímo úměrná jeho průměru. Hloubka vniknutí h je dána vztahem [0]:

$$h = K \cdot \frac{P}{d} \quad (1)$$

kde K je konstanta zahrnující modul pružnosti, P je tlakové zatížení a d je průměr válcového indentoru.

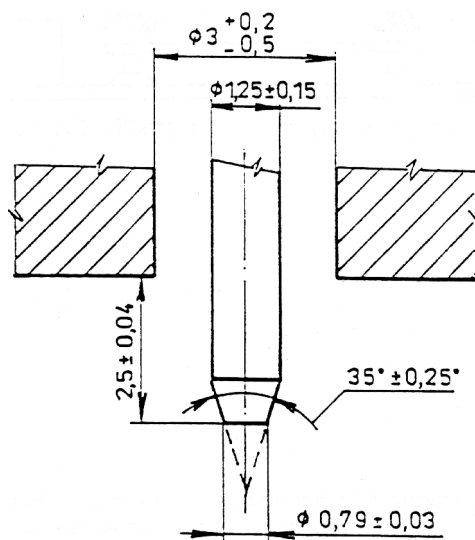
Na zkoušení tvrdosti pryže se používají různé druhy tvrdoměrů. Jejich princip spočívá v měření hloubky vniknutí měřicího tělesa do vzorku. Rozdíly mezi jednotlivými tvrdoměry jsou především ve tvaru a rozměru zkušební hrotu, velikosti zatížení a charakteru působení a rovněž ve způsobu vyjadřování výsledků. Nejčastěji je metoda měření tvrdosti Shore A [0],[0].

Metoda Shore A

Tato metoda je vhodná pro měření tvrdosti pryže v intervalu 35 až 80 Shore A. Zkušební hrot tvrdoměru Shore A je vyrobený z tvrdé ocele s průměrem 1,25 mm. Jeho konec má tvar zkoseného kuželu s vrcholovým úhlem 35° a s průměrem zkoseného konce 0,79 mm. Síla pružiny je dána výrazem:

$$F' = 550 + 75 \cdot H_A \quad (2)$$

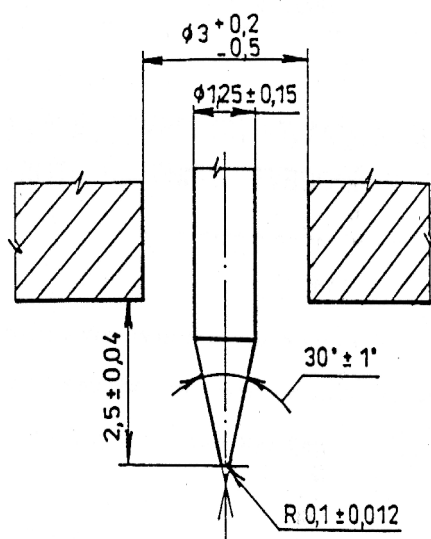
kde F je přitlačná síla v milivoltech a H_A je hodnota tvrdosti naměřená na tvrdoměru typu A [0].



Obr. 2. Zkušební hrot tvrdoměru typu A [0]

Na měření malých tělísek se používá tvrdoměr Shore D, který se liší od tvrdoměru Shore A různou přitlačnou silou a geometrií hrotu. Síla přitlačné pružiny tvrdoměru typu Shore D je dána vztahem:

$$F' = 445 \cdot H_D \quad (3)$$



Obr. 3. Zkušební hrot tvrdoměru typu D [0]

Tvrдость pryže s příměsí jakýchkoliv plniv se zvyšuje a to do velkých koncentrací lineárně. Vliv plniva je charakterizován konstantou plniva, která závisí na typu plniva a souvisí s hodnotou olejové adsorpce[0],[0].

Tvrдость podle Brinella

Tvrдость podle Brinella se určuje vztahem mezi silou, kterou se vtlačuje ocelová kulička do zkoušeného materiálu, a velikostí plochy důlku, který tím po určité době působení na zkušební tělese vznikne. Podstatou zkoušky je tedy vtlačování ocelové kuličky určitého poloměru předepsaným tlakem určitou dobu do zkoušeného materiálu a změření hloubky nebo průměru důlku [0].

1.3.4 Stanovení odrazové pružnosti

Stanovení odrazové pružnosti patří mezi nejznámější metody na určování schopnosti pryže absorbovat při náraze mechanickou energii. Měření je založené na měření výšky odrazu kovového kyvadla, které dopadlo z určité výšky na zkušební tělísko. Poměr výšky a pádu, vyjádřený v procentech, udává hodnotu odrazové pružnosti. Na uvedeném principu jsou založeny dvě metody stanovení odrazové pružnosti: metoda podle Schoba a Lüpkeho [0].

Odrázová pružnost podle Schoba

Metoda je určena ke kontrole odrazové pružnosti pryžových materiálů. Je méně vhodná pro zjišťování elastických vlastností při vývojových pracích.

Kyvadlo podle Schoba sestává z pevného kladiva, zakončeného nárazníkem kulovitěho tvaru [0].

Odrázová pružnost podle Lüpkeho

Hlavní účelem této zkoušky je stanovení hodnot odrazové pružnosti pro vývojové práce. Výhoda této metody je též v tom, že měření je možno provádět i za jiných teplot, než je teplota zkoušení za normálních klimatických podmínek.

Kyvadlo podle Lüpkeho tvoří válcovitá tyč zakončená kulovitým tvarem a je zavěšena na čtyřech nitích [0].

1.4 Funkce deformační energie pro izotropní materiály

➤ *Mooney model*

Mooney-Rivlinův materiálový model byl publikován již v roce 1940. Popisuje lineární vztah mezi napětím a deformací ve smyku,

$$W = \frac{G_M}{4} \sum_{i=1}^3 \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i} \right)^2 + \frac{H_M}{4} \sum_{i=1}^3 \left(\lambda_i^2 - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \quad (4)$$

kde G_M je nazýván modul tuhosti a H_M je konstanta vyjadřující symetrii funkce deformační

energie k převráceným hodnotám deformace $\frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}, \frac{1}{\lambda_3} [0], [0], [0]$.

➤ *Mooney-Rivlinův model*

Rivlin v roce 1948 rozšířil Mooneyovu funkci deformační energie do tvaru

$$W = \frac{1}{2} \mu_{MR} (I_1 - 3) + f(I_2 - 3) \quad (5)$$

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

Bylo ukázáno, že výraz (5) lze vyjádřit jako nekonečnou řadu funkcí invariantů I_1 a I_2

$$W = \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n \quad (6)$$

kde $C_{\infty} = 0$

Mooney-Rivlinovu funkci s dvěma parametry lze tedy psát

$$W = C_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3\right) \quad (7)$$

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (8)$$

kde I_1 a I_2 jsou první respektive druhý invariant pravého Cauchyho tenzoru deformace a C_1, C_2 jsou dva parametry pružnosti [0],[0],[0]

$$C_1 = \frac{G_M + H_M}{4} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{G_M + H_M}{4} \quad (10)$$

➤ *Neo-Hookeovský model*

Funkce deformační energie má tvar

$$W = \frac{1}{2} \mu_{NH} (I_1 - 3) \quad (11)$$

kde μ_{NH} je modul pružnosti ve smyku (parametr používaný pro nestlačitelné materiály) a I_1 první invariant.

Tento jednoduchý tvar funkce deformační energie poskytuje první přiblížení vlastností pryžových materiálů, jehož předností je jednoduchost matematického zpracování. Poskytuje také dobrou shodu s experimentálními daty až do hodnoty 45% deformace v tahu [0],[0],[0].

➤ *Vargův model*

Funkci deformační energie vyjadřuje vztah

$$W = \mu_V (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - 3) \quad (12)$$

kde λ_1, λ_2 a λ_3 jsou hlavní protažení a μ_V je modul pružnosti ve smyku [0],[0].

➤ **Yeohův model**

Yeohův model je vhodný pro materiál, v němž se modul pružnosti ve smyku výrazně mění s deformací. Z počátku má klesající tendenci, avšak při velkých deformacích se tendence mění na stoupající. Funkce deformační energie je vyjádřena ve tvaru

$$W = c_1(I_1 - 3) + c_2(I_1 - 3)^2 + c_3(I_1 - 3)^3 \quad (13)$$

kde pro konstanty platí $c_2 < 0$, $c_1 > 0$ a $c_3 > 0$ [0],[0],[0].

➤ **Ogdenův model pro izotropní materiál**

Je vhodný pro popis nestlačitelného materiálu (s Jakobiánem deformace $J=1$). Deformační energie je vyjádřena pomocí hlavních protažení $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ve tvaru

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (14)$$

kde N je počet členů, μ_p smykové moduly a α_p jsou experimentální parametry [0],[0],[0].

Poznamenejme, že:

pro $N = 2$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = -2$ se jedná o Mooney-Rivlinův model,

pro $N = 1$, $\alpha_1 = 2$ se jedná o Neo-Hookeovský model

pro $N = 1$, $\alpha_1 = 1$ se jedná o Vargův model

2 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zjistit materiálové vlastnosti hyperelastických materiálů označených vzorek01-04. Vzorky byly zajištěny společností Barum Continental spol. s r.o. Na těchto vzorcích byla provedena měření materiálových charakteristik. Na základě naměřených výsledků materiálových vlastností byl vytvořen numerický model tlumiče, na který byly aplikovány naměřené materiálové charakteristiky a simulovali jsme chování tlumiče.

Hypotézy řešení:

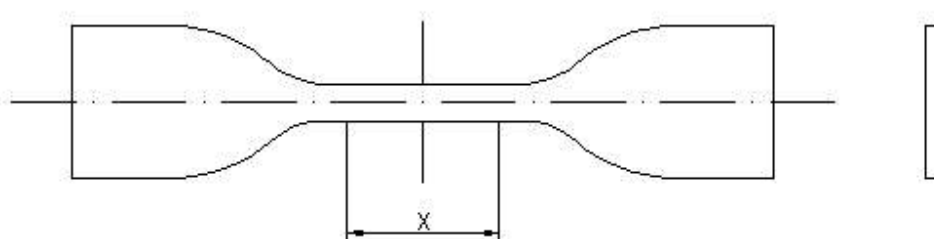
- Přehled hyperelastických materiálů, jejich vlastností a zkoušek zabývajících se jejich charakterizací.
- Přehled modelů popisujících deformační energii hyperelastických izotropních materiálů.
- Naměření materiálových charakteristik hyperelastických materiálů a experimentální určení materiálových parametrů potřebných pro výpočet pomocí MKP.
- Sestavení modelu tlumiče, aplikace vhodné metody pro řešení, následné získání deformačních a napětových parametrů tlumiče numerickým výpočtem.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Příprava zkušebních těles

3.1.1 Zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek

Zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek (Obr. 4) byla použita pro stanovení tahových vlastností. Zkušební tělesa byla vyseknuta ve směru orientace materiálu.



Obr. 4. Tvar oboustranných lopatek s označením pracovní části [0]

Standardní tloušťka zúžené části musí být $2,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ pro typy 1, 2 a 3 a $\pm 1,0 \text{ mm}$ pro typ 4. Délka pracovní části musí odpovídat tabulce I. Pro naše měření byl použit typ 1 s pracovní délkou $25,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ [0],[0].

Tab. I. Délka pracovní části oboustranných lopatek [0]

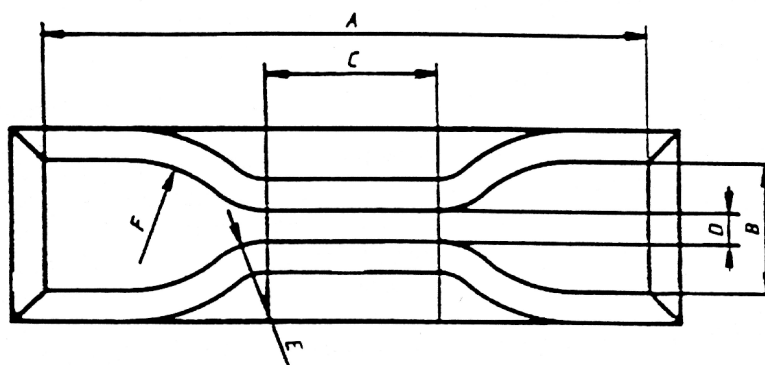
Typ zkušebního tělesa	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Délka pracovní části	$25,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$

Ostatní rozměry lopatek jsou dány příslušným sekacím nožem. Všechny vysekávací a vyřezávací nože musí odpovídat ISO 4661-1. Vysekávací nože pro přípravu oboustranných lopatek musejí mít rozměry uvedené v tabulce (Tab. II.) a na obrázku (Obr. 5.) Odchylka šířky od vzdálenosti břitů v zúžené části nože nesmí v žádném bodě přesáhnout $0,05 \text{ mm}$ od dané šířky [0],[0].

Tab. II. Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek [0]

Rozměr	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4

A Celková délka	115,0	75,0	50,0	35,0
B šířka lopatek	25,0±2,0	12,5±1,0	8,5±1,0	6,0±0,5
C Délka zužené části	33,0±2,0	25,0±1,0	16,0±1,0	12,0±0,5
D šířka zužené části	6,0±0,4	4,0±0,1	4,0±0,1	2,0±0,1
E Přejímový poloměr vnější	14,0±1,0	8,0±0,5	7,5±0,5	3,0±0,1
F Přejímový poloměr vnitřní	25,0±2,0	12,5±1,0	10,0±0,5	3,0±0,1



Obr. 5. Vysekávací nůž pro zkušební tělesa oboustranných lopatek [0]

3.1.2 Zkušební tělesa ve tvaru kotouče

Zkušební tělesa ve tvaru kotouče byla použita pro měření tvrdosti Shore A a pro měření odrazové pružnosti podle Schoba. Tloušťka zkušebního tělesa musí být pro měření tvrdosti, resp. odrazové pružnosti nejméně 6 mm. Jeho povrch musí být hladký, bez trhlin a jiných defektů [0],[0].

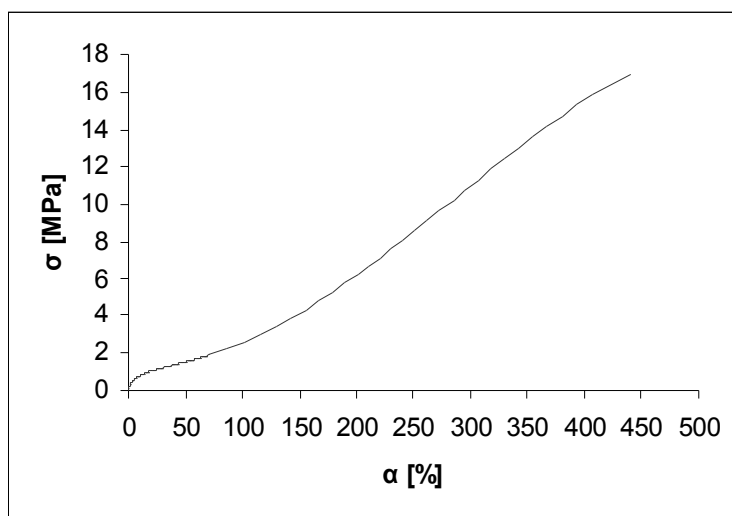
3.2 Tahová zkouška

Podstata zkoušky spočívá v protahování standardních zkušebních těles na trhacím stroji konstantní rychlostí. Odečítají se hodnoty síly a prodloužení potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik zkušebních těles v průběhu jejich protahování a v okamžiku přetržení [0].

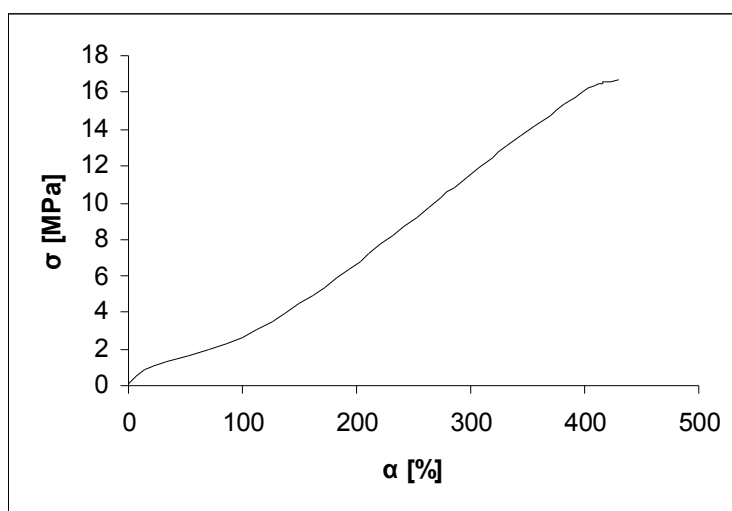
- *Pevnost v tahu* je definována jako maximální napětí v tahu, potřebné přetržení zkušebního tělesa.
- *Tažnost* je definována jako tahová deformace pracovní délky v okamžiku přetržení.
- *Modul* je poměrné napětí, při kterém se dosáhne určitého předem zvoleného prodloužení pracovní části zkušebního tělesa (např. M100,M200,M300,M500) [0], [0].

Zkušební těleso se vloží do trhacího stroje tak, aby bylo zabezpečeno symetrické upnutí rovnoběžných částí lopatek, a aby byl tah rozložen rovnoměrně na příčný průřez tělesa. Spustí se chod stroje a průběžně se zaznamenávají změny pracovní délky zkušebního tělesa a síly po celou dobu zkoušky s přesností $\pm 0,2$ %. Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou upínací čelistí byla 500 mm/min [0],[0].

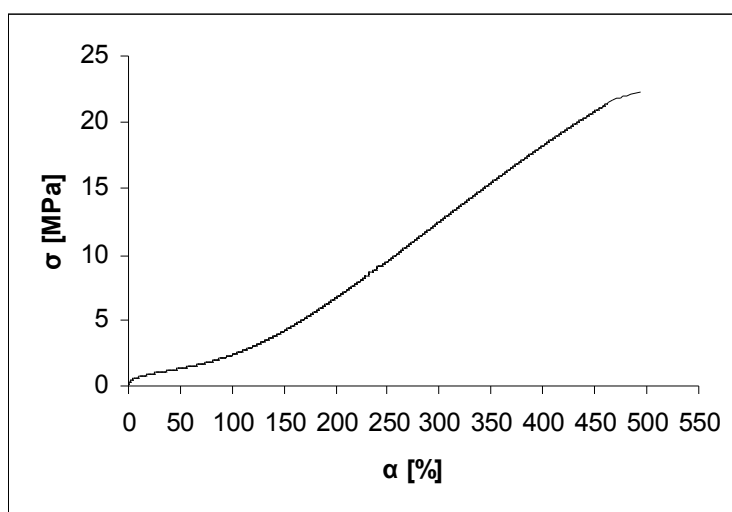
Zkouška byla realizována dle normy ČSN ISO 37 na trhacím stroji T 2000 v laboratoři Demoroom ALFA TECHNOLOGIES na FT UTB ve Zlíně. Každý vzorek byl měřen šestkrát. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tab. III).



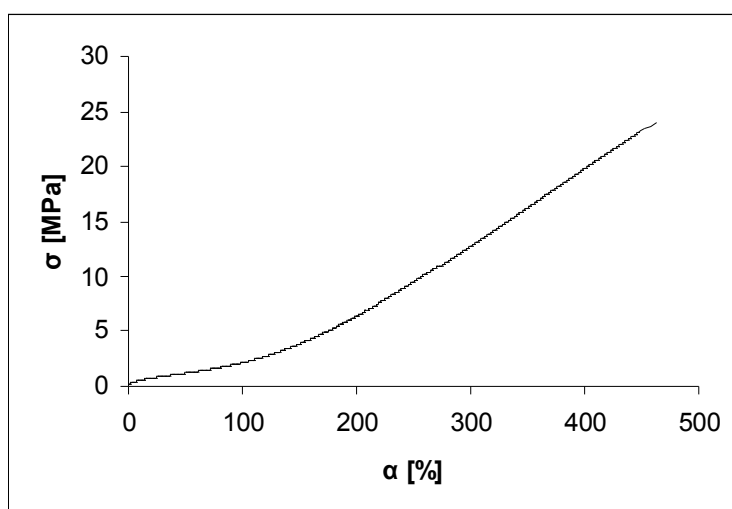
Obr. 6. Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorek01



Obr. 7. Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorek02



Obr. 8. Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorek03



Obr. 9. Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorek04

Tab. III. Hodnoty tahové zkoušky

č.směsi	pevnost v tahu [MPa]	tažnost [%]	M100 [MPa]	M200 [MPa]	M300 [MPa]	M500 [MPa]
vzorek01	17,023	435,75	2,547	6,151	10,890	-
vzorek02	16,644	424,00	2,675	6,649	11,545	-
vzorek03	22,063	479,55	2,381	6,753	12,573	22,217
vzorek04	23,979	463,35	2,134	6,283	12,755	-

3.3 Tvrdost Shore A

Podstatou zkoušky tvrdosti je měření hloubky vniknutí zkušební hrotu vtlačovaného do materiálu za specifických podmínek.

Tvar hrotu, přitlačná síla a doba vtlačování hrotu do materiálu ovlivňují výsledky měření, takže mezi výsledky získanými na jednom typu tvrdoměru a hodnotami naměřenými na jiném tvrdoměru či přístroji pro měření tvrdosti není žádný vztah [0],[0].

Při měření tvrdosti Shore se hrot vysunuje od 0 do 2,5 mm. Velikosti vysunutí odpovídá tvrdost od 0 do 100. Při měření se tvrdoměr přiloží v kolmém směru na zkušební těleso tak, aby špička zkušební hrotu byla nejméně 12 mm od okraje zkušební tělesa. Tvrdost se odečítá na stupnici přístroje po uplynutí tří sekund od dosažení pevného dotyku mezi opěrnou patkou a zkušebním tělesem. Provádí deset měření tvrdosti na různých místech zkušební tělesa, vzdáleného od sebe nejméně 6 mm. Z takto naměřených hodnot se vypočte medián [0],[0].

Podmínky zkoušky byly stanoveny dle ČSN ISO 7619. Měření proběhlo pomocí digitálního přístroje HHP-2001. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tab. IV).

Tab. IV. Hodnoty tvrdosti Shore A

č.měření	tvrdost Shore A			
	vzorek01	vzorek02	vzorek03	vzorek04
1	69,20	67,48	64,34	56,94
2	69,50	68,42	62,80	57,12
3	69,50	66,50	63,04	56,98
4	69,82	67,90	63,80	57,40
5	70,14	68,22	63,76	57,34
6	69,92	67,94	63,34	57,04
7	70,72	67,92	64,22	57,46
8	69,64	67,48	63,84	57,14
9	69,66	68,08	64,10	56,90
10	69,58	67,92	63,70	57,24
min.hodnota	69,20	66,50	62,80	56,90
max.hodnota	70,72	68,42	64,34	57,46
medián	69,65	67,92	63,78	57,13

3.4 Odrazová pružnost na přístroji Schob

K měření se používá princip kyvadlového kladiva, které dopadá z určité výšky na zkoušený materiál. Odrazová pružnost je poměr energie vrácené k energii dodané při rázu vyjádřená v % [0],[0].

Kladivo přístroje se nechá dopadnout na zkušební těleso a zjistí se výška, do které se odrazí vlivem elasticity materiálu. Zkušební těleso se připevní na podložku pružinou tak, aby náraz kladiva byl veden ve vzdálenosti nejméně 10 mm od okraje zkušební tělesa. Kladivo se uvolní, nechá se dopadnout na zkušební těleso a vrátí se opět původní polohy. Údery se opakují třikrát, přičemž se nesleduje výška odrazu kladiva. Teprve 4., 5., a 6. odraz kladiva se zaznamenává. Výsledná hodnota odrazové pružnosti v % je aritmetický průměr ze 3 stanovení [0],[0].

Zkouška byla provedena na přístroji Schob v laboratořích ÚPMT FT UTB ve Zlíně dle normy ČSN 62 1480. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tab. V).

Tab. V. Hodnoty odrazové pružnosti

č. směsi	Odrasová pružnost Schob [%]			
	1	2	3	průměr
vzorek01	14,5	14,0	14,5	14,3
vzorek02	18,5	19,0	18,0	18,5
vzorek03	30,0	30,5	30,5	30,3
vzorek04	41,0	40,5	41,0	40,8

3.5 Výpočet modulů z nastavitelných parametrů

Rovnice Mooney-Rivlinova je schopná popsat tahové křivky všech kaučukových sítí velmi dobře až k inflexnímu bodu. Parametry C_1 , C_2 se vyhodnotí z experimentálních údajů, jestliže se data zpracují ve smyslu linearizovaného tvaru rovnice:

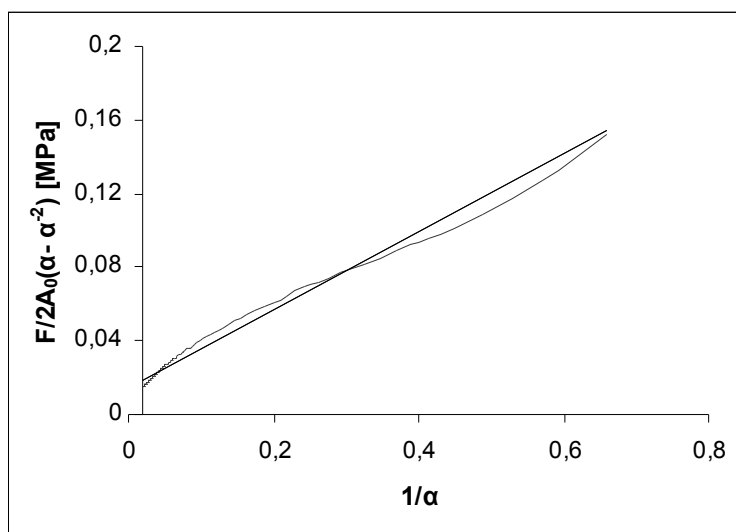
$$\frac{F}{2A_0(\alpha - \alpha^{-2})} = C_1 + C_2 \frac{1}{\alpha} \quad (15)$$

Hodnoty funkce na levé straně rovnice se vynesou proti $1/\alpha$ a závislost se proloží přímkou, která vytíná na ose pořadnic úsek C_1 , její směrnice je pak C_2 . Zjištěné parametry C_1 , C_2 se použijí k výpočtu modulu pružnosti [0].

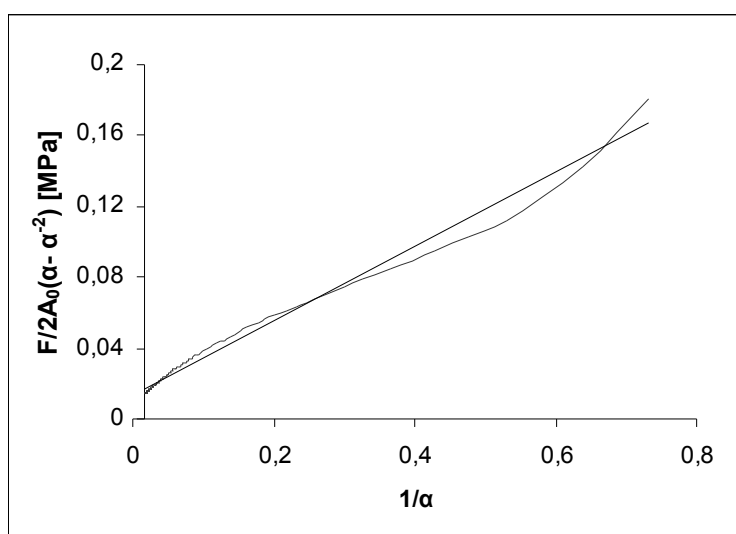
Z rovnic (16) a (17) plyne výraz pro modul pružnosti:

$$E' = 6C_1 + 6C_2 \quad (16)$$

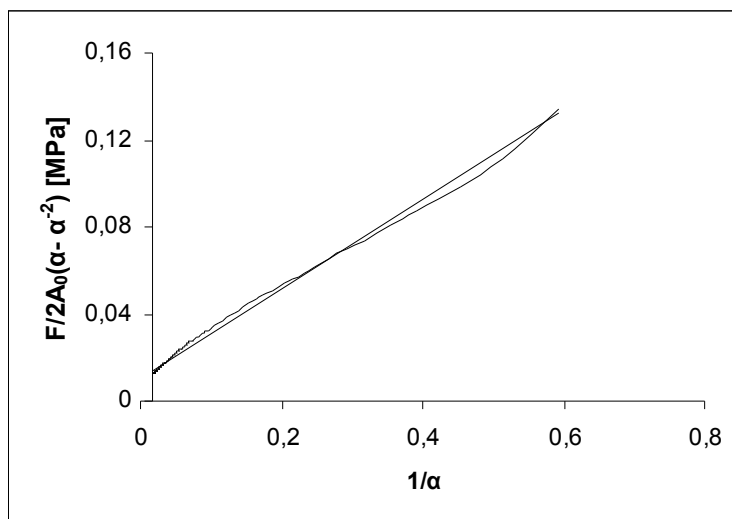
$$G = 2C_1 + 2C_2 \quad (17)$$



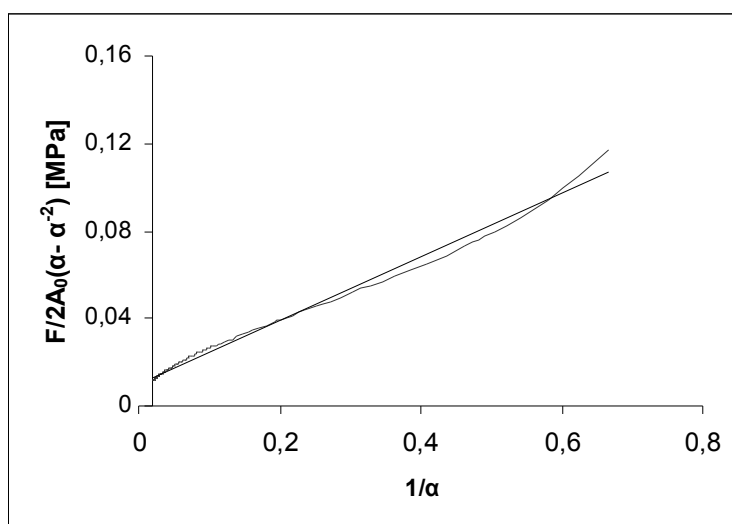
Obr. 10. Linearizace tahové křivky pro vzorek01



Obr. 11. Linearizace tahové křivky pro vzorek02



Obr. 12. Linearizace tahové křivky pro vzorek03



Obr. 13. Linearizace tahové křivky pro vzorek04

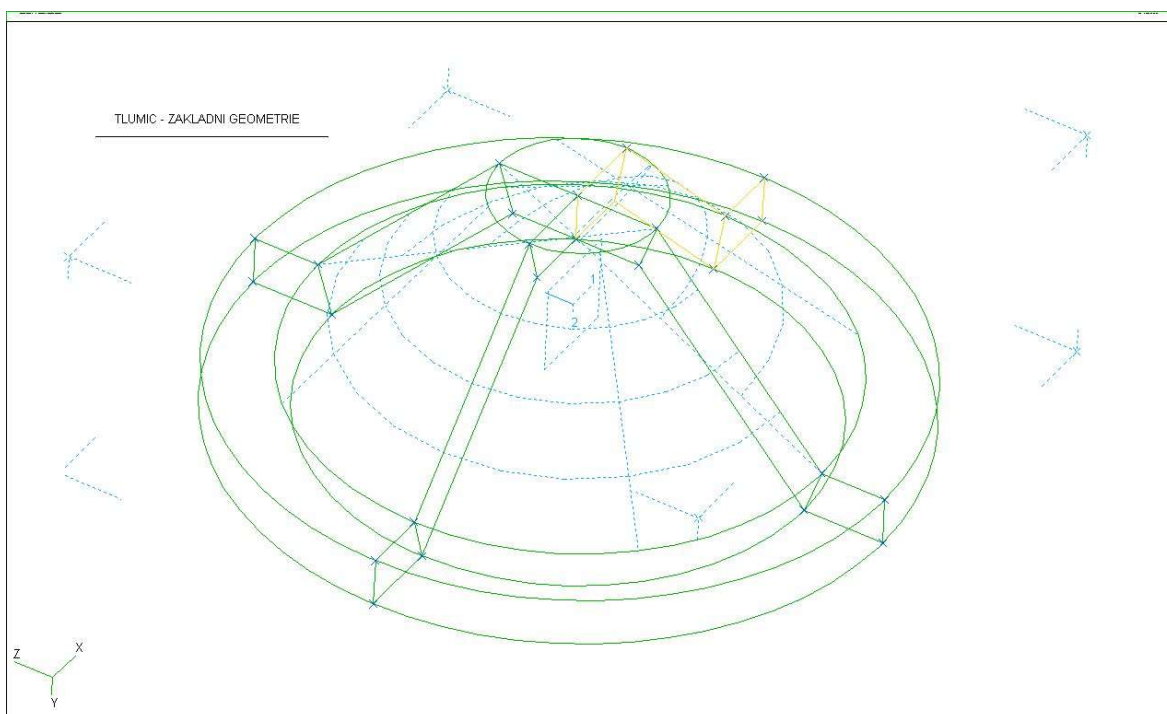
Tab. VI. Hodnoty parametrů a modulů pro vzorky 01-04

č. směsi	C_1 [MPa]	C_2 [MPa]	E [MPa]	G [MPa]
vzorek01	0,013	0,212	1,358	0,453
vzorek02	0,013	0,211	1,344	0,448
vzorek03	0,011	0,206	1,297	0,432
vzorek04	0,010	0,145	0,932	0,311

3.6 Sestrojení modelu tlumiče

3.6.1 Návrh konstrukce základní geometrie tlumiče

Tvar tlumiče byl navržen pro tlumení vibrací silou lineárně rozloženou v horní části tlumiče podle přání zákazníka a účelu, ke kterému je konstruován. Předběžné geometrické rozměry tlumiče byly definovány rovněž zákazníkem. Geometrie tlumiče byla navržena pro okrajové podmínky uchycení tlumiče a přenos zátěžných sil. Model tlumiče byl vytvořený v preprocesoru Bacon v programu Samcef, který je určen pro pevnostní, dynamické, stabilitní, akustické a tepelné analýzy pomocí metody konečných prvků (MKP).

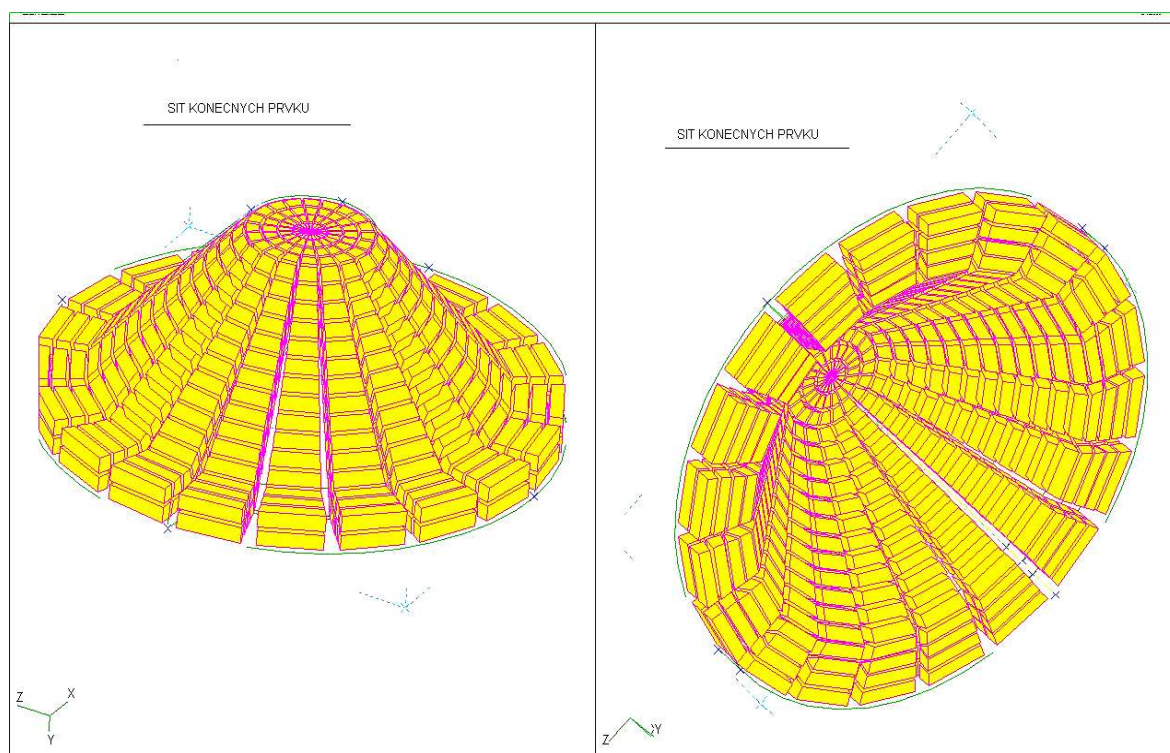


Obr. 14. Tlumič – základní geometrie

3.6.2 Aplikace metody konečných prvků (MKP) pro analýzu tlumiče

Teoretický úvod

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, jejímž matematickým základem je diskretizace úlohy. Ta spočívá v rozdělení zkoumané spojité oblasti na konečný počet podoblastí, stručně nazývané konečnými prvky. Jednotlivé konečné prvky jsou spolu spojeny v uzlových bodech. V současné době je to nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda pro řešení úloh mechaniky kontinua [0],[0].



Obr. 15. Síť konečných prvků

Její nejrozšířenější variantou je deformační metoda. Tato varianta vychází z Lagrangeova variačního principu minima celkové potenciální energie soustavy (těleso + jeho zatížení), resp. jeho vnějších a vnitřních sil. Matematicky je princip formulovaný rovnicí

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (18)$$

kde Π = celková potenciální energie, Π_i = deformační energie vnitřních sil tělesa a Π_z = práce vnějších sil [0].

Tento princip znamená, že ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, pro který nabývá potenciální energie systému minimální hodnotu.

Celkovou potenciální energii elementu pro spojitě třídimenziální těleso rozdělené do m elementů lze vyjádřit vztahem

$$\Pi^e = \sum_{e=1}^m \Pi^e - \{d\}^T \{f\} \quad (19)$$

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_p^e \quad (20)$$

V maticovém tvaru lze energetický funkcionál zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned} \Pi^e = \frac{1}{2} [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] [B] dV \right) \{d\}^e - \\ - [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] \{\epsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_\Gamma [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right) \end{aligned} \quad (21)$$

V rovnici první a druhý integrál představují potenciální energii přetvoření, třetí integrál představuje práci vykonanou objemovými silami a poslední integrál práci vykonanou rovnoměrným zatížením na povrchu oblasti Γ .

Pro rovnováhu systému nabývá potenciální energie minima, tzn. že první variace energetického potenciálu

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (22)$$

Matematickými úpravami předcházejících rovnic se dostane tvar tzv. matice tuhosti elementu ve tvaru

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (23)$$

kde $[B]$ je transformační matice a matice $[D]$ je maticí fyzikálních konstant. Po dalších provedených úpravách se dostane standardní tvar rovnice statické analýzy pro element v následujícím tvaru

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (24)$$

kde vektor zobecněných posuvů

$$^T [d]^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \dots \dots u_r \ v_r \ w_r] \quad (25)$$

a vektor zatížení v uzlech je

$$^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \ \{f\}^2 \ \dots \dots \dots \{f\}^r] \quad (26)$$

kde r je počet uzlů na elementu.

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

$$[K] \{d\} = \{f\} \quad (27)$$

kde $[K]$ = matice tuhosti pro celý systém

$\{d\}$ = vektor uzlových posunutí pro celý systém

$\{f\}$ = 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

$$\{\sigma\} = [C] [B] \{d\} \quad (28)$$

V případě, že existují počáteční napětí, je nutné je superponovat $[0],[0],[0],[0]$.

3.6.3 Deformační energie pro hyperelastický izotropní materiál

Pro spojitý hyperelastický nestlačitelný homogenní, izotropní a elastický materiál lze vyjádřit funkci deformační energie podle Mooney-Rivlina ve tvaru [0],[0]

$$W = W\{I_1, I_2, I_3\} \quad (29)$$

kde

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (30)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (31)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (32)$$

jsou invarianty přetvoření I_i ($i = 1, 2, 3$) a λ_i ($i = 1, 2, 3$) jsou poměrná přetvoření ve směru hlavních os $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$. Vzhledem k nestlačitelnosti pryže má třetí invariant jednotkovou hodnotu $I_3 = 1$. V takovém případě je deformační energie W pouze funkcí I_1 a I_2 .

Pro homogenní biaxiální deformaci lze odvodit z rovnice (29) závislosti hlavních napětí σ_1 a σ_2 na funkci deformační energie ve tvaru [0],[0],[0]

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (33)$$

$$\sigma_2 = \frac{2}{\lambda_2} \left(\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (34)$$

kde

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \quad (35)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (36)$$

Protože deformační energie a její parciální deformace $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ a $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ nelze určit analyticky, musí být tyto funkce určeny experimentálně z biaxiálních prodloužení ve směru hlavních os. V takové případě lze z rovnic (33) a (34) vyjádřit parciální derivace deformační energie

jako závislosti na hlavních napětích σ_1 a σ_2 a jim odpovídajících poměrných přetvořeních λ_1 a λ_2 . Rovnice lze psát ve tvaru [0],[0]

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{2}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left(\frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} \right) \quad (37)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{2}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left(\frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}} \right) \quad (38)$$

Pro analýzu napětí a deformací pomocí MKP musíme brát v úvahu nestlačitelnost pryže. To lze vyjádřit např. pomocí Lagrangeova multiplikátoru kdy nahradíme deformační energii W rovnicí

$$\tilde{W} = W\{I_1, I_2\} + p/2(I_3 - 1) \quad (39)$$

kde p je Lagrangeův multiplikátor pro přetvoření nezávislý na poli posunutí. V našem případě je předpokládána obecná funkce deformační energie ve tvaru [0]

$$W = \sum_{i,j=1}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (40)$$

Mooney-Rivlinův model

Ve dvou řešených případech je uvažovaný hyperelastický materiál Mooney-Rivlinova typu. V prvním případě je deformační energie vyjádřena rovnicí [0]

$$W_1 = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (41)$$

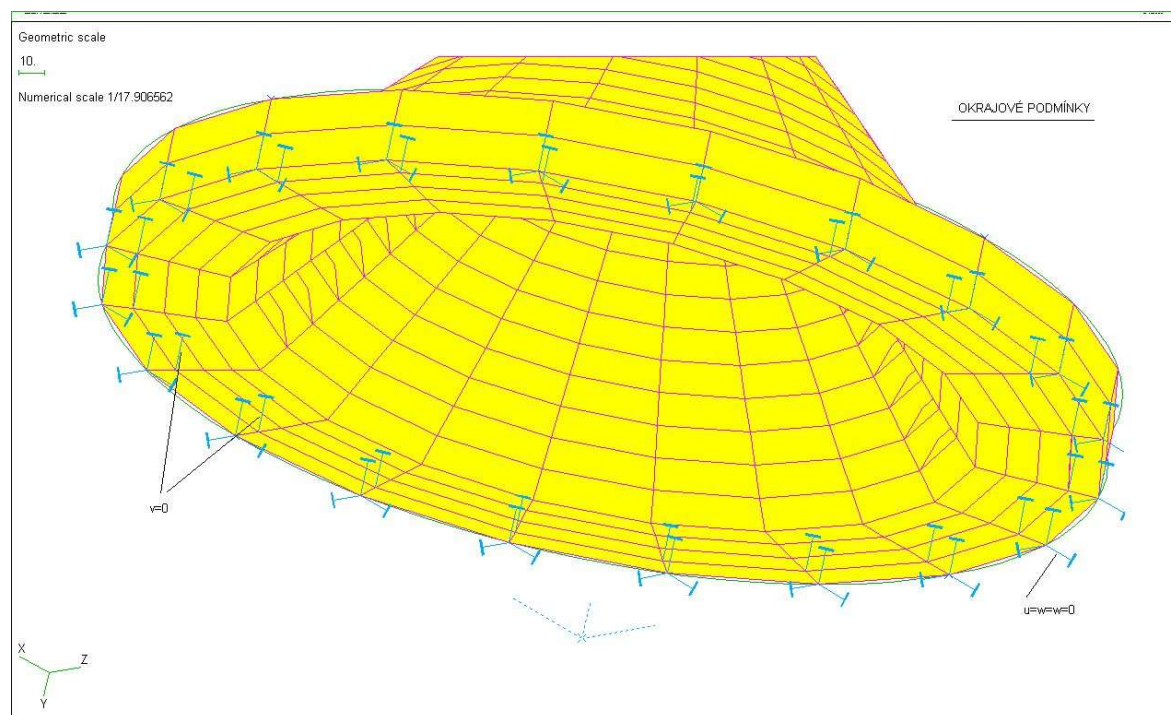
Ve druhém případě je deformační energie vyjádřena rovnicí [0],[0]

$$W_1 = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (42)$$

kde koeficienty C_{10} , C_{01} , C_{20} a C_{30} jsou Mooney-Rivlinovi parametry

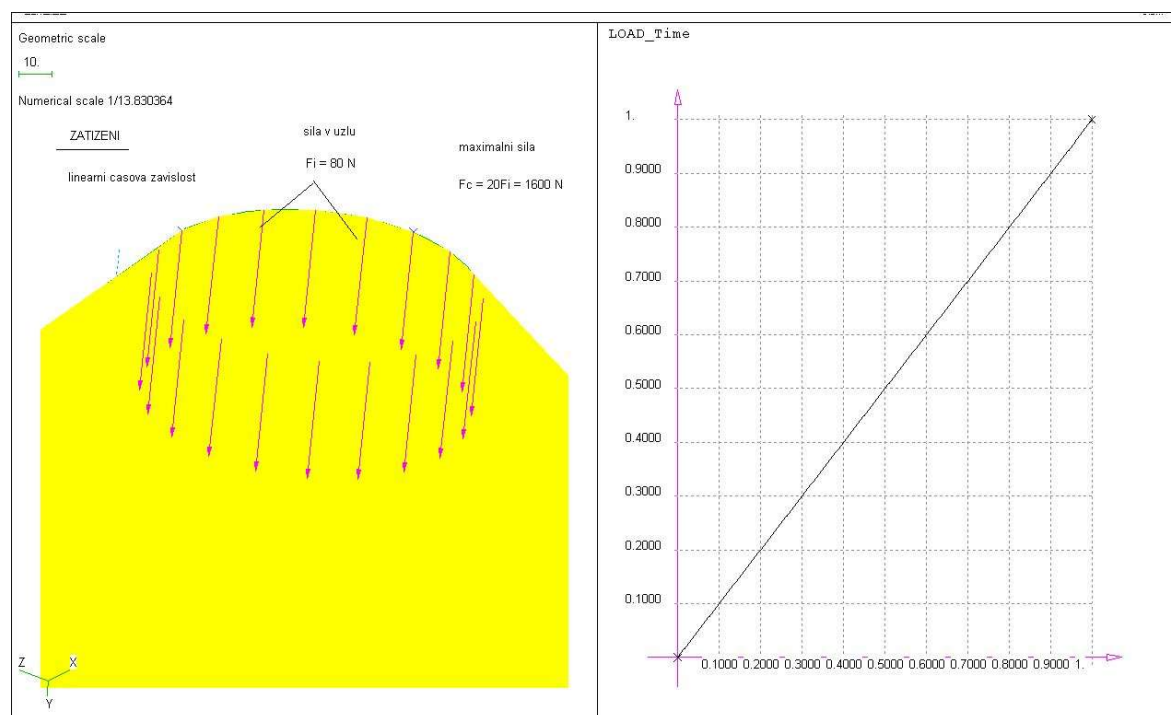
3.6.4 Okrajové podmínky a zatížení tlumiče

Tlumič bude při svém použití uložen do pouzdra.



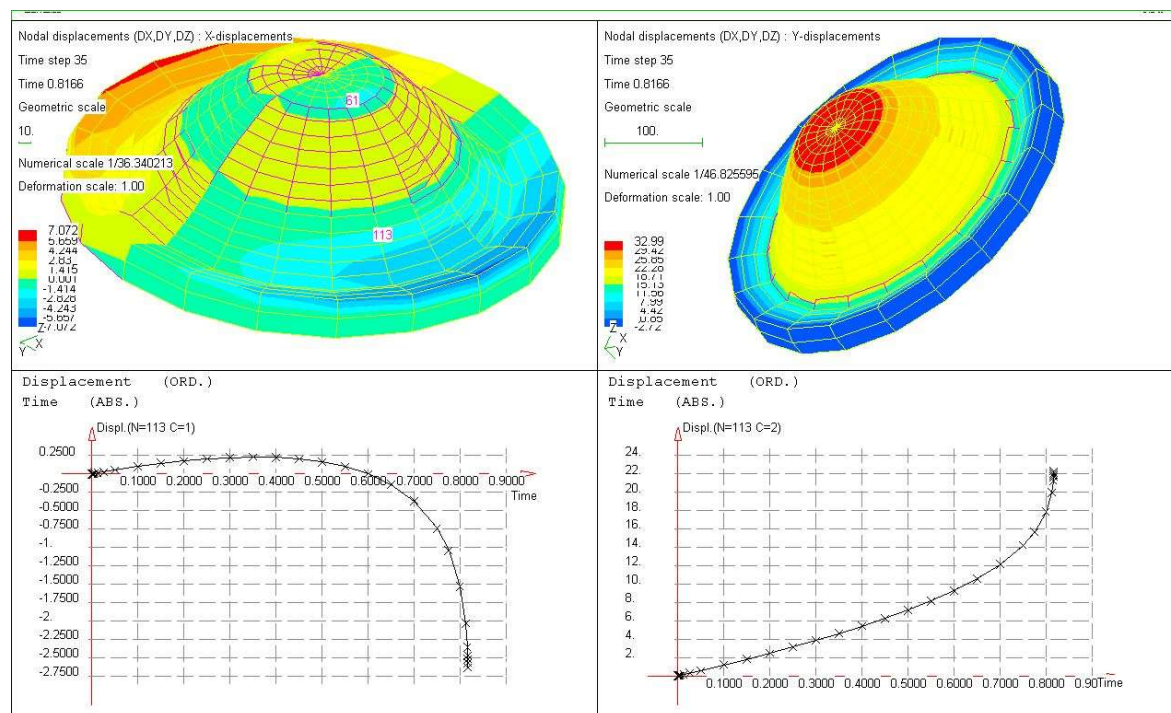
Obr. 16. Okrajové podmínky

Zatížení bylo nastaveno v horní části tlumiče, kde každý uzel byl zatížen silou 80N.

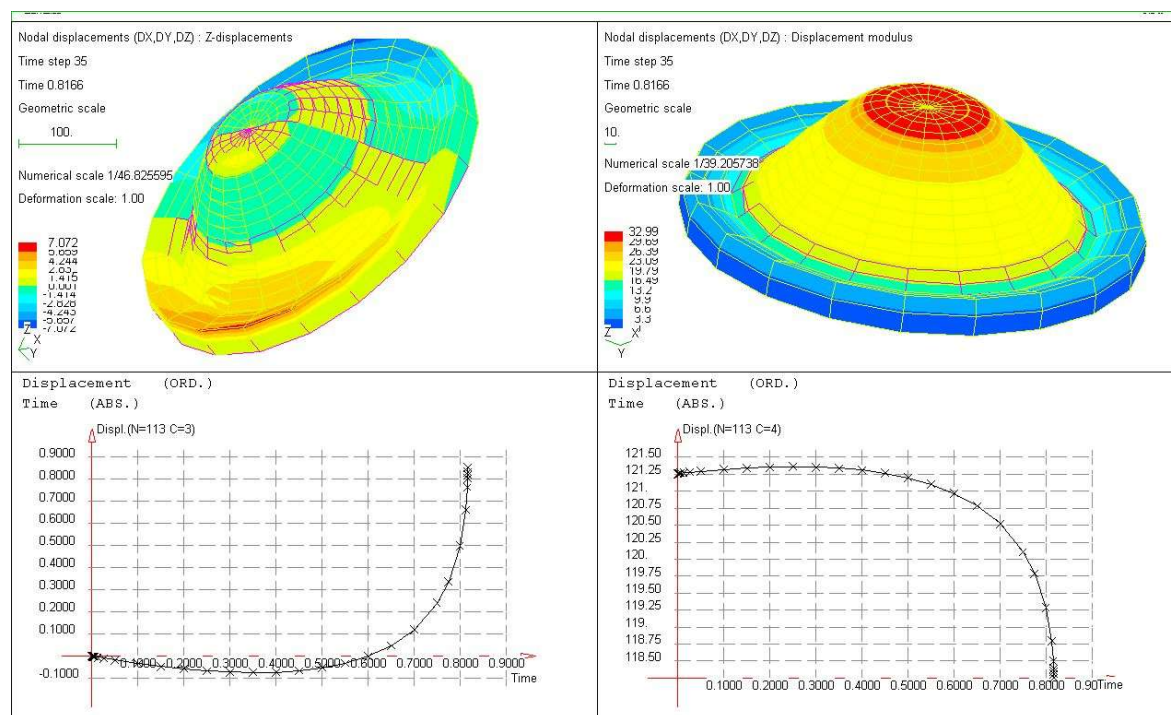


Obr. 17. Zatížení s nastavenou časovou funkcí

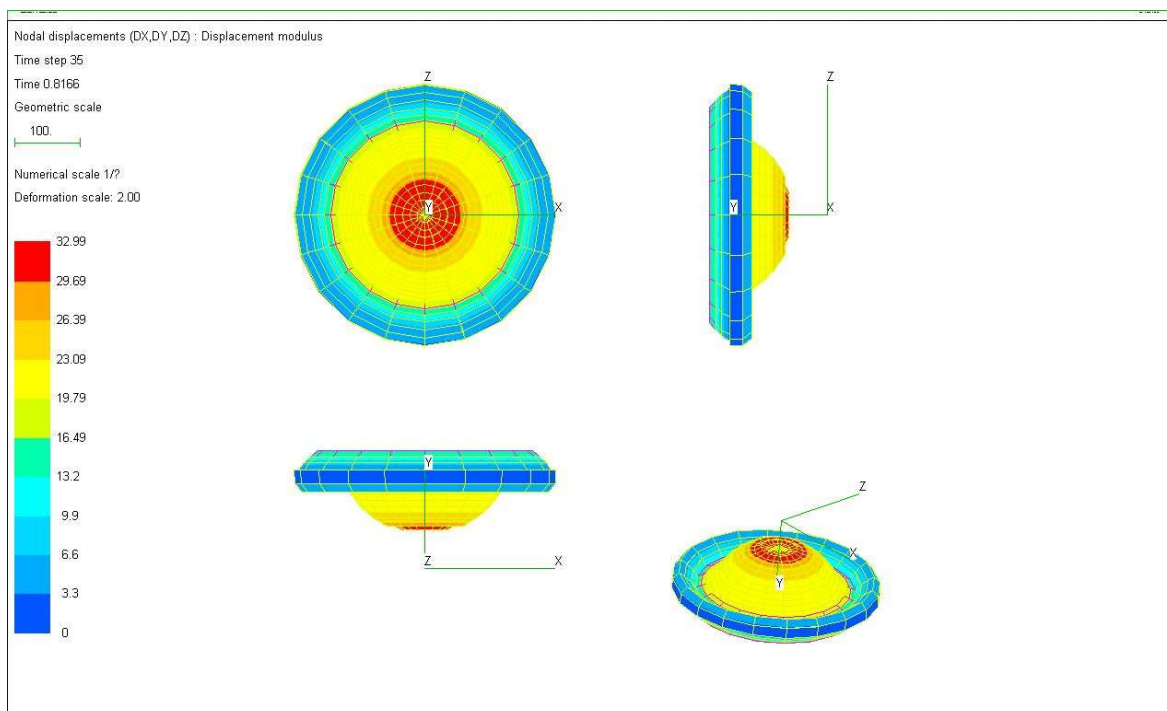
3.6.5 Zobrazení a časový průběh deformací navrženého tlumiče



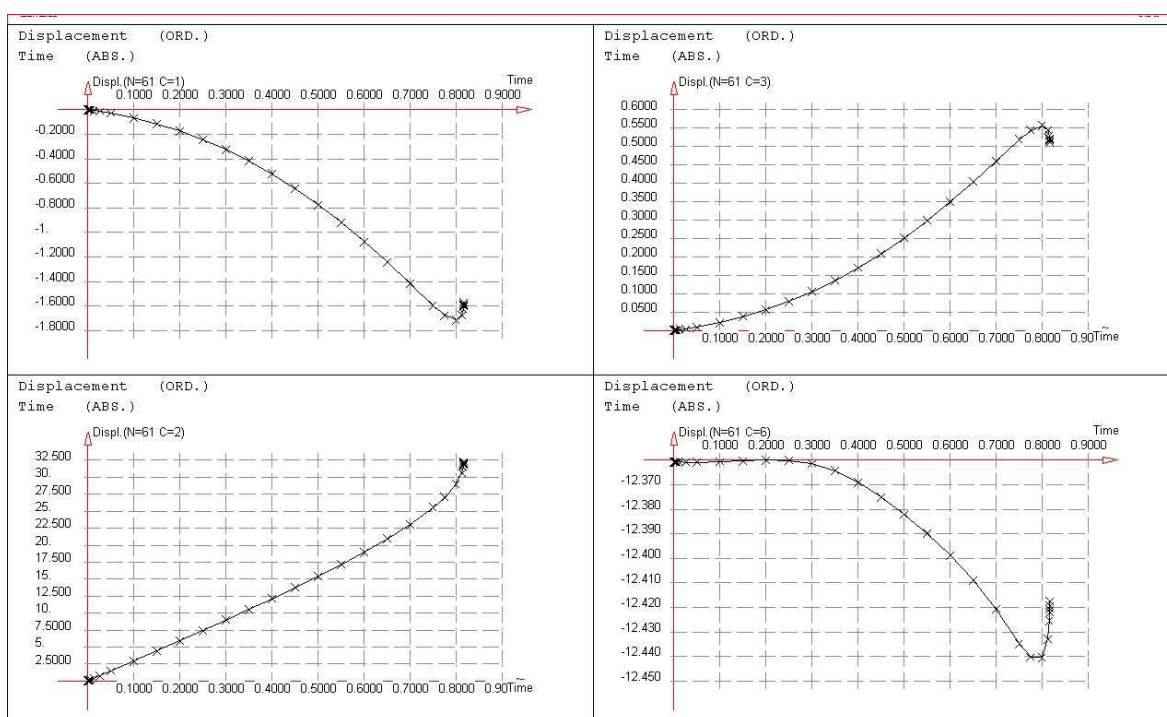
Obr. 18. Rozložení deformace tlumiče v ose X a Y pro vzorek01



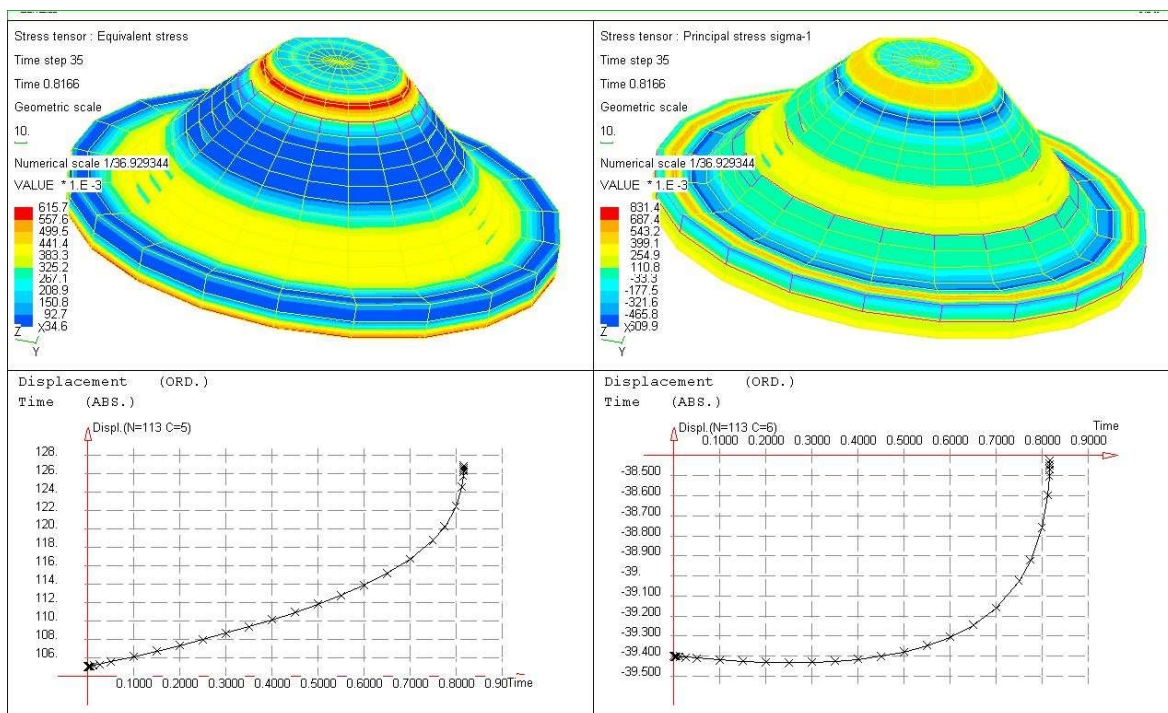
Obr. 19. Rozložení deformace tlumiče v ose Z pro vzorek01



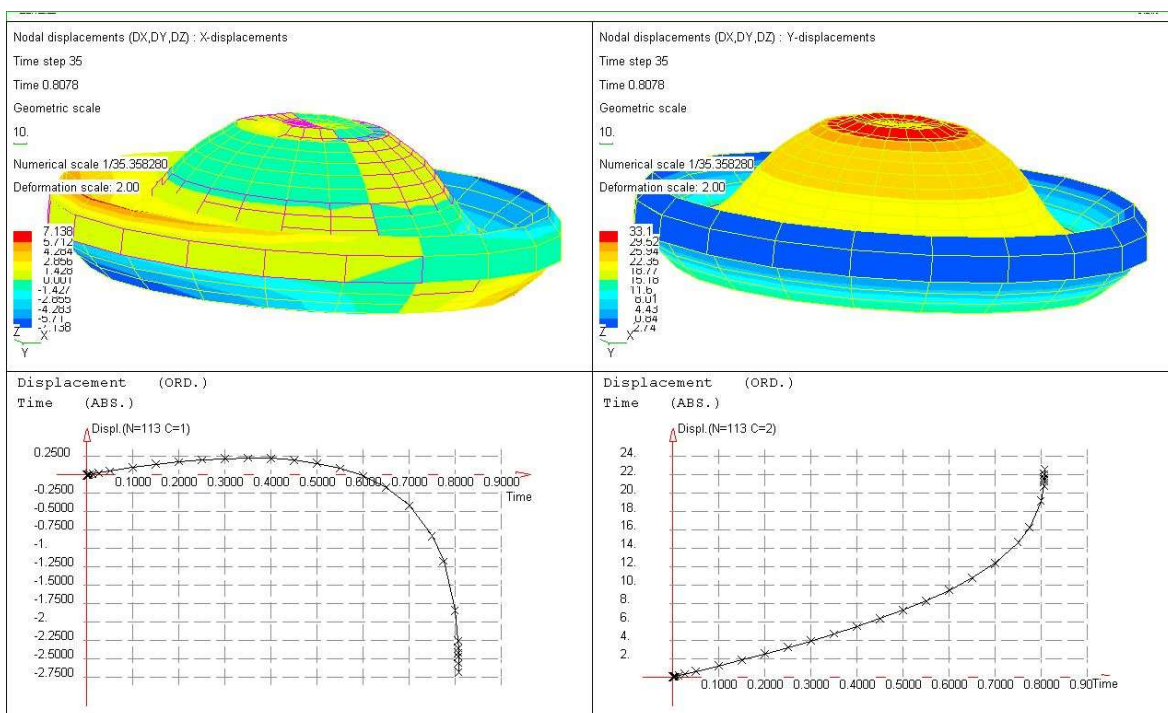
Obr. 20. Deformace tlumiče v jednotlivých rovinách



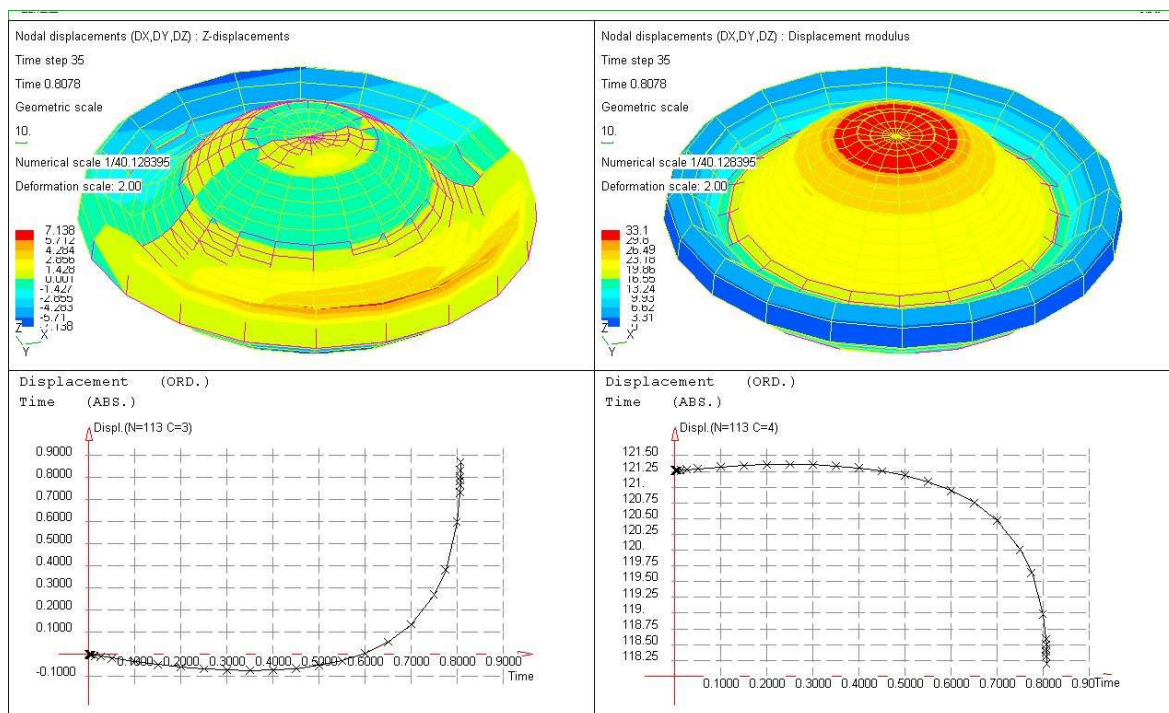
Obr. 21. Posuvy v jednotlivých osách při deformaci tlumiče ze vzorku01



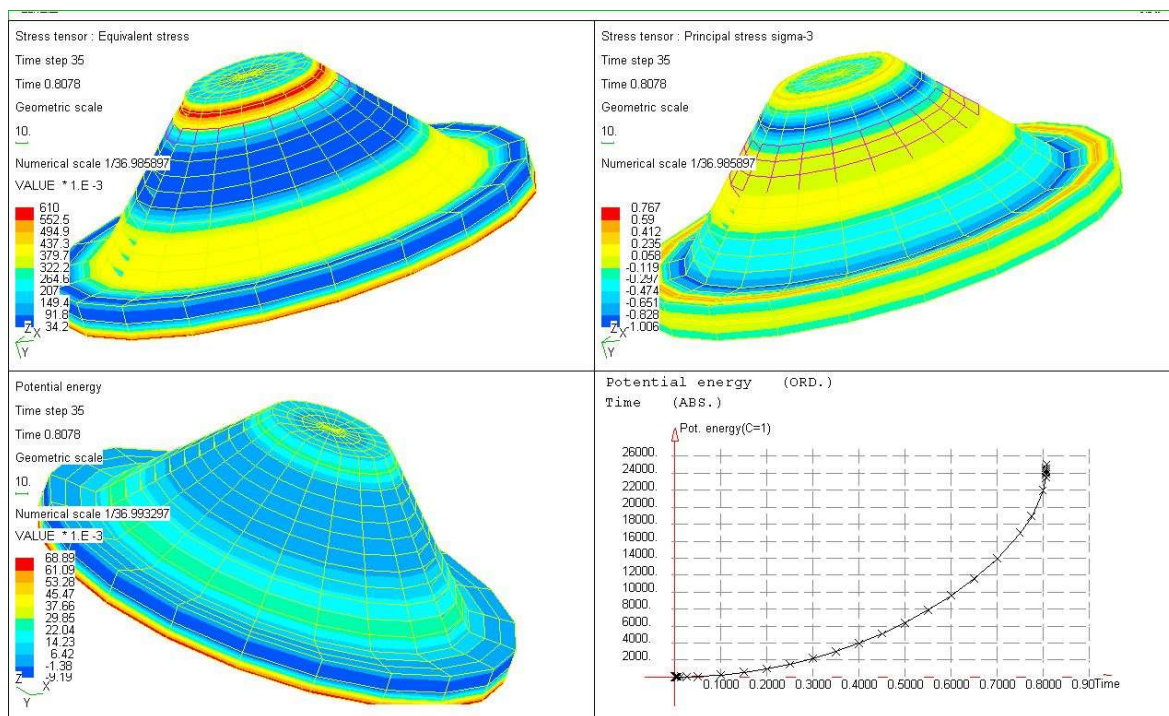
Obr. 22. Napětí a posuvy pro vzorek01



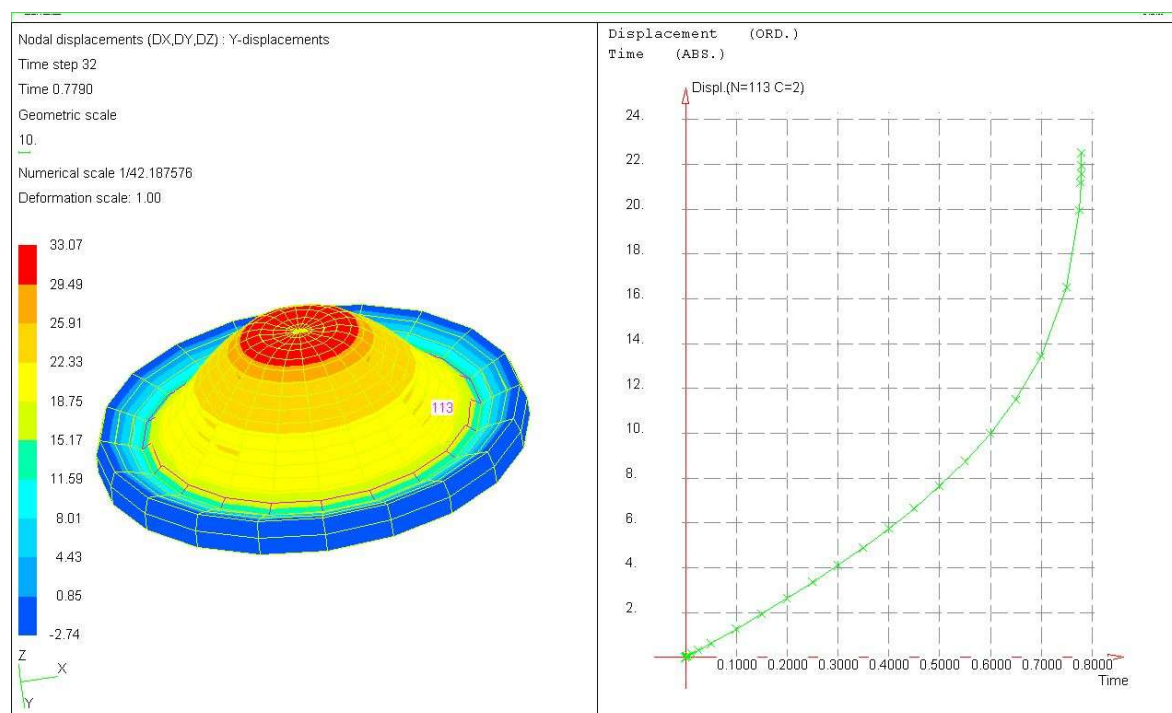
Obr. 23. Rozložení deformace tlumiče v ose X a Y pro vzorek02



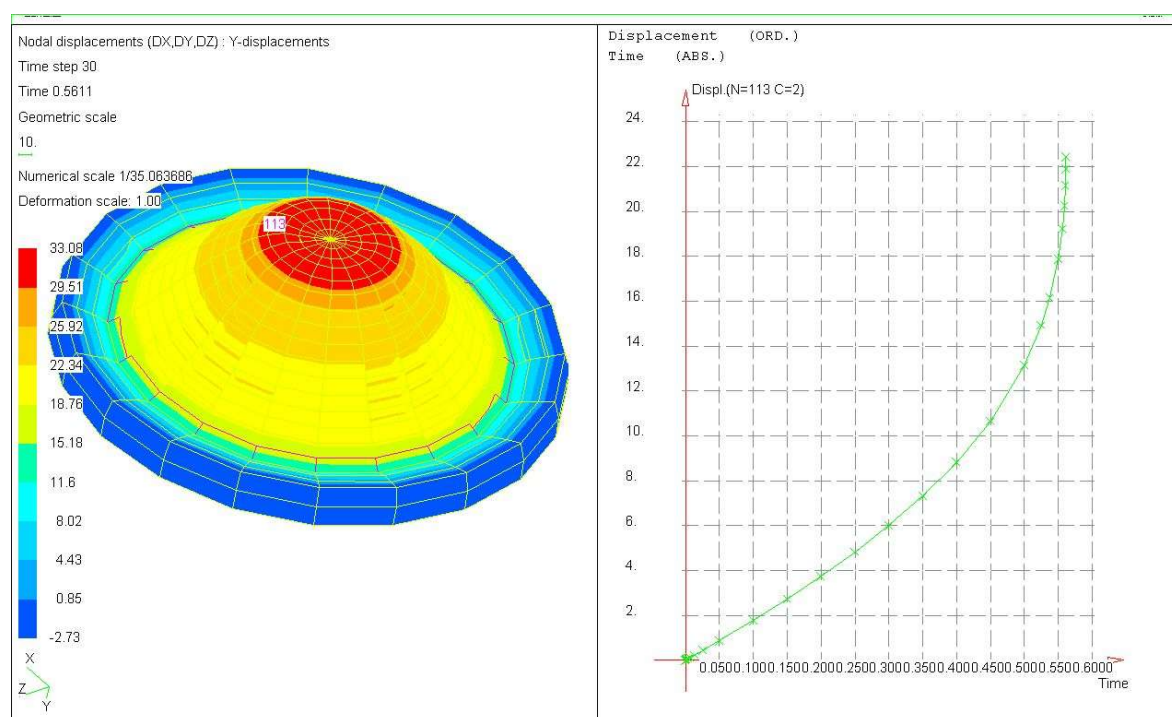
Obr. 24. Rozložení deformace tlumiče v ose Z pro vzorek02



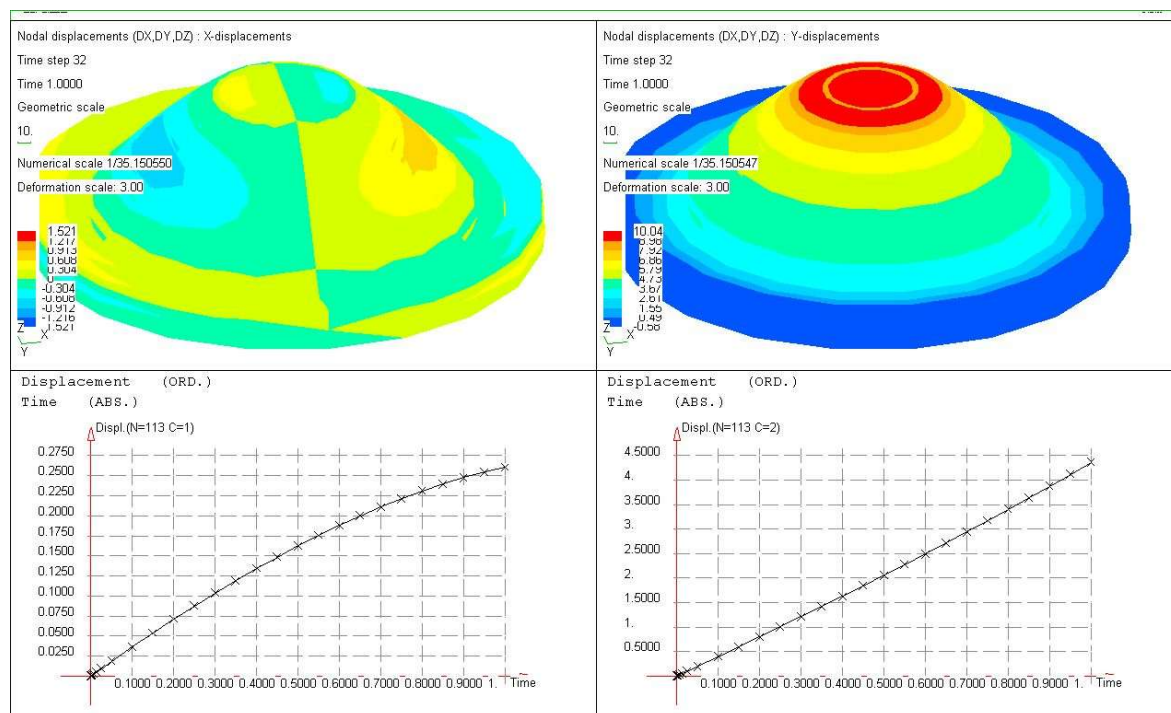
Obr. 25. Napětí a posuvy pro vzorek02



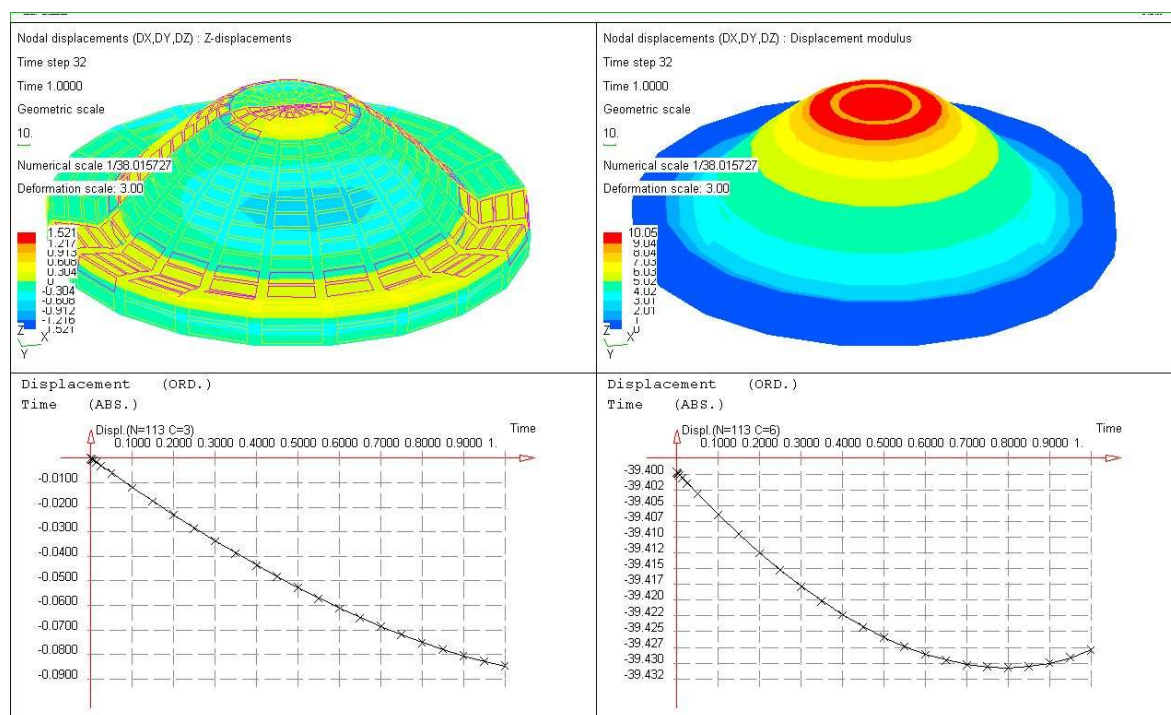
Obr. 26. Rozložení deformace a posuvy v ose Y pro vzorek03



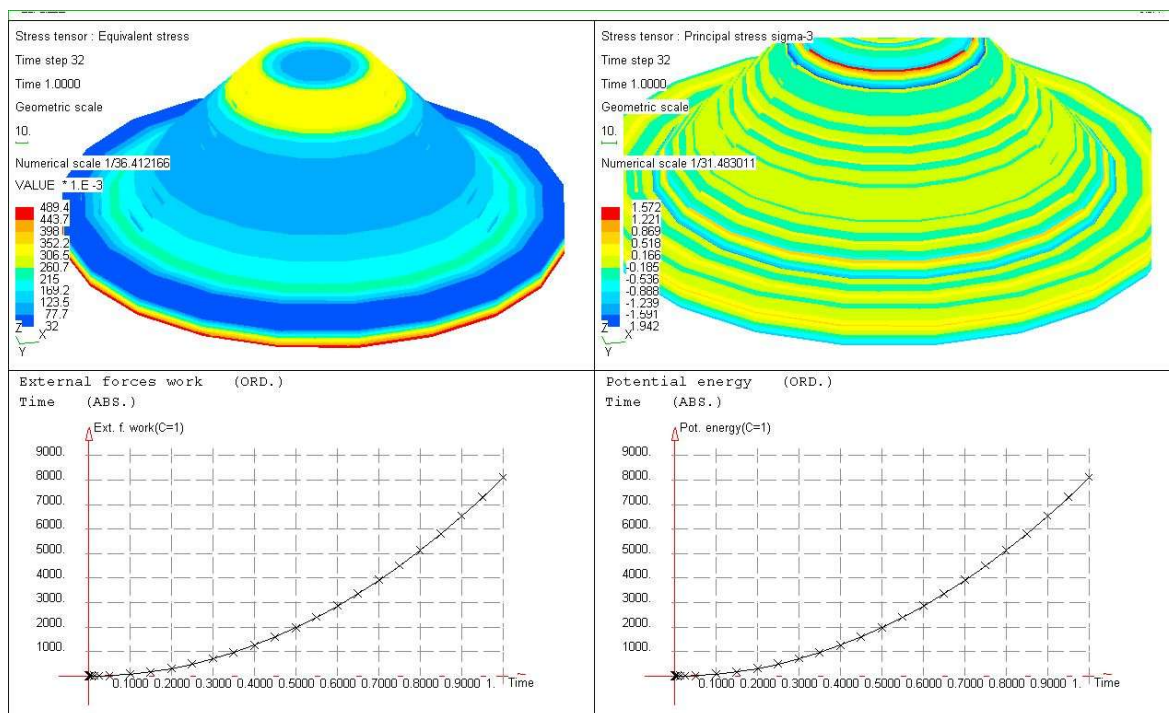
Obr. 27. Rozložení deformace a posuvy v ose Y pro vzorek04



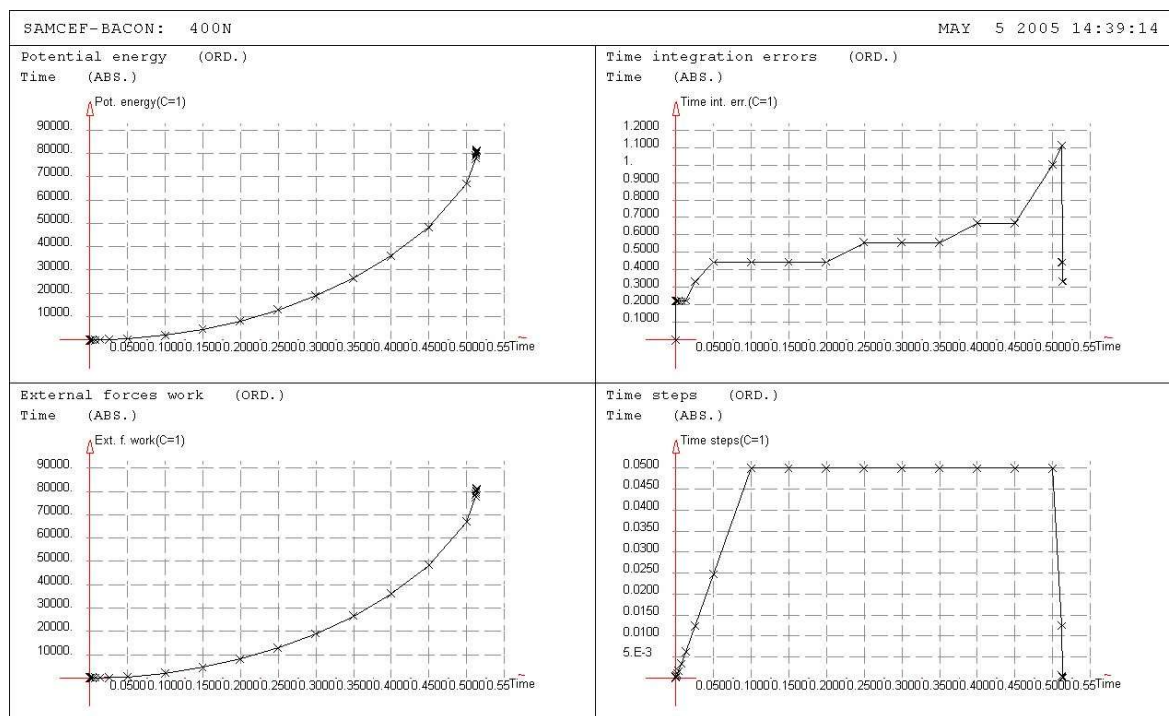
Obr. 28. Rozložení deformace tlumiče v ose X a Y pro tvrdší pryž



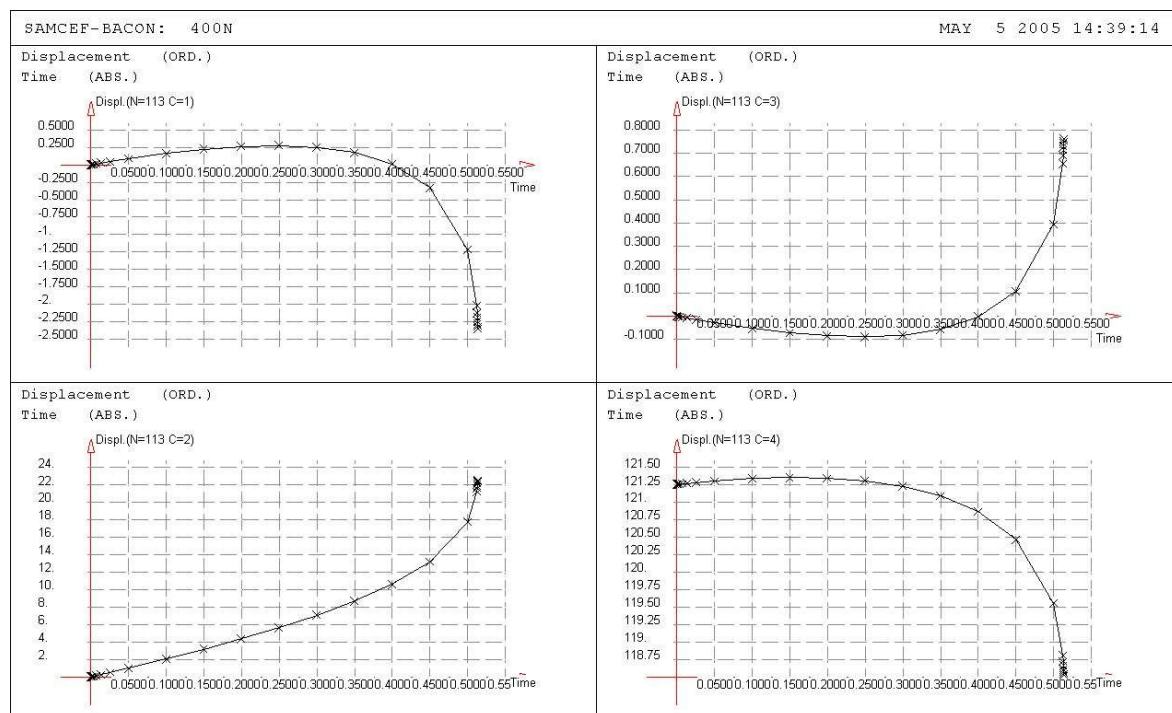
Obr. 29. Rozložení deformace tlumiče v ose Z pro tvrdší pryž



Obr. 30. Napětí a posuvy pro tvrdší pryž



Obr. 31. Průběhy deformačních veličin pro zatěžující cílu 400N

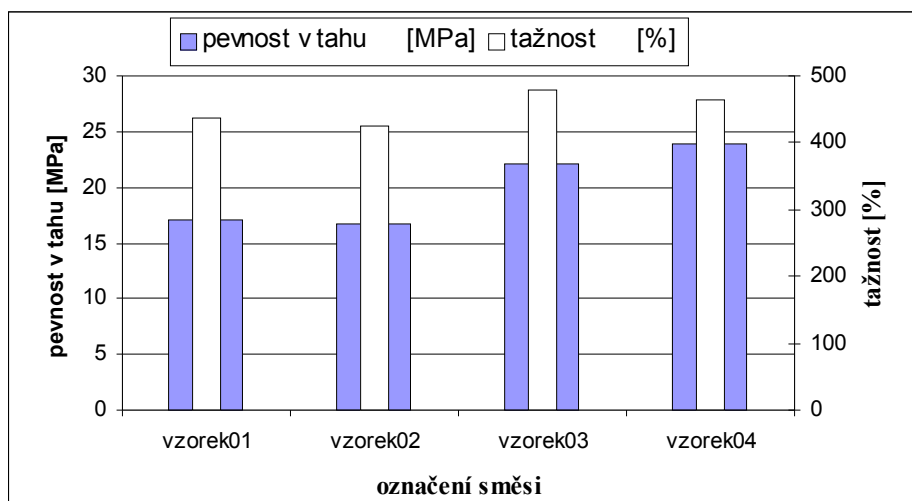


Obr. 32. Posuvy pro tvrdší pryž při zatížení 400N

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

4.1 Materiálové charakteristiky

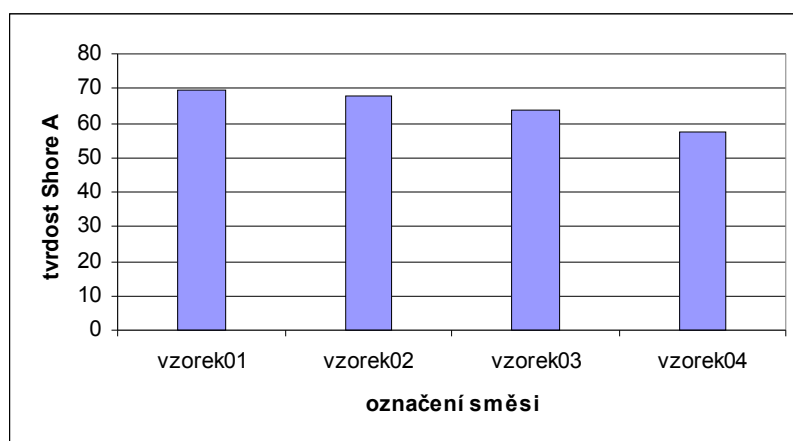
4.1.1 Tahová zkouška



Obr. 33. Porovnání tažnosti a pevnosti v tahu

Z výsledků získaných při jednoosé tahové zkoušce na Obr. 33 jsme zjistili, že nejvyšší hodnoty pevnosti a tažnosti vykazuje směs vzorek03 a směs vzorek04. Horší tahové vlastnosti mají směsi vzorek01 a vzorek02. Tažnost jednotlivých vzorků se liší nepatrně, můžeme prohlásit, že je přibližně stejná. U pevnosti v tahu jsou znát podstatnější rozdíly mezi vzorky.

4.1.2 Tvrdost Shore A

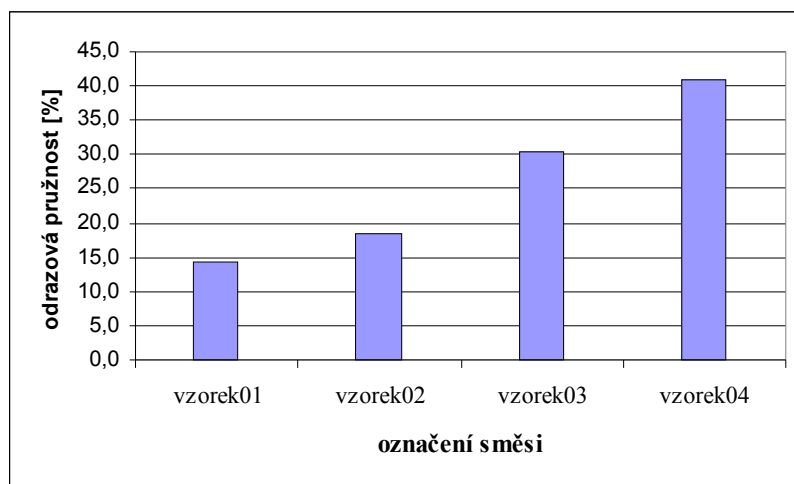


Obr. 34. Porovnání tvrdosti Shore A

Nejvyšší hodnotu tvrdosti Shore A má směs vzorek01. Nejnižších hodnot tvrdosti Shore A pak dosahoval vzorek04. Hodnoty tvrdostí Shore A porovnané na Obr. 34 se u měřených

vzorku01-04 příliš nelišily, naopak můžeme konstatovat, že vzorky01-04 jsou z hlediska tvrdosti Shore A přibližně stejné a spadají do kategorie měkkých pryží.

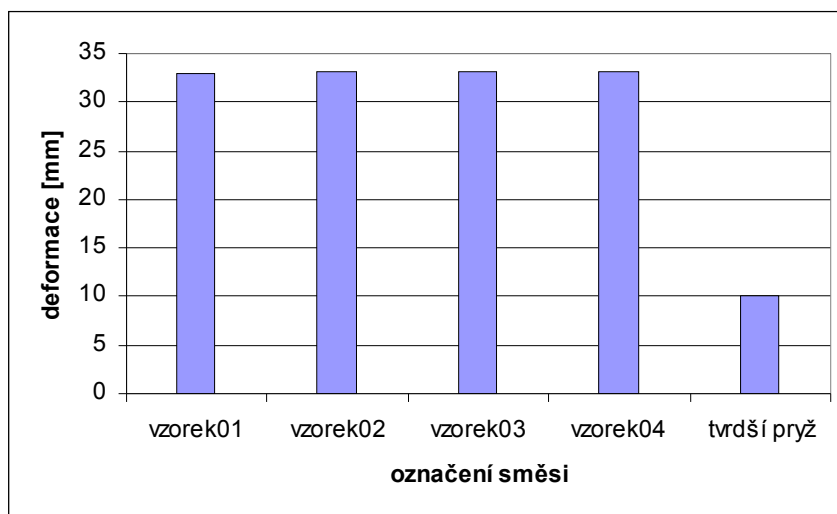
4.1.3 Odrazová pružnost Schob



Obr. 35. Porovnání odrazové pružnosti Schob

Při porovnání odrazové pružnosti vzorků01-04 na Obr. 35 můžeme vidět, že nejnižších hodnot odrazové pružnosti dosahuje vzorek01. Naopak nejvyšších hodnot pak vzorek04. Celkově můžeme konstatovat, že hodnoty odrazové pružnosti jednotlivých vzorků se vzájemně podstatě liší.

4.2 Deformační charakteristiky jednotlivých vzorků



Obr. 36. Porovnání deformací sestrojených tlumičů pro jednotlivé materiály

Po naměření a vyhodnocení materiálových charakteristik vzorků01-04 jsme sestrojili návrh modelu tlumiče. Pro analýzu modelu tlumiče jsme zadali získané naměřené materiálové charakteristiky a parametry. Numerickým řešením pomocí MKP jsme vypočítali pro jednotlivé vzorky01-04 deformační a napěťové veličiny, které jsme vzájemně vyhodnotili podle deformace v ose zatížení. V Obr. 36 je provedeno grafické srovnání deformací v ose tlumiče pro jednotlivé vzorky na základě zadaných naměřených vstupních parametrů vzorků01-04. Všechny vzorky získané z laboratoře Barum Continental s.r.o. vykazují pouze “měkké“ pryžové charakteristiky. Proto byly z literatury [0] převzaty hyperelastické konstanty pro tvrdou pryž a pro analýzu pomocí MKP byl použit čtyřparametrický Mooney-Rivlinův model popsáný rovnicí (41). Porovnání “měkkých“ modelů s tvrdou pryží podle získaných výsledků je znázorněn v posledním sloupci grafu na Obr. 36.

ZÁVĚR:

Cílem této diplomové práce bylo zjistit materiálové charakteristiky vzorků01-04 a vyhodnotit jejich tlumicí vlastnosti. Materiálové charakteristiky vzorků01-04 byly určeny experimentálním měřením. V práci je předložen vhodný postup k získání potřebných materiálových parametrů.

Zadané vzorky01-04 vykazují podobné nelineární materiálové charakteristiky. Menší rozdíly mezi materiálovými charakteristikami se objevují pouze při měření odrazové pružnosti a při zkoušce pevnosti v tahu. Viditelné odchylky a rozdíly jsou zřetelné hlavně mezi materiály vzorku01 a vzorku04.

Na základě naměřených nelineárních výsledků materiálových vlastností byl vytvořen numerický model tlumiče, na který byly aplikovány naměřené materiálové charakteristiky a simulovali jsme nelineární chování tlumiče z hlediska deformačního a napětového. Model tlumiče byl zatížen silou lineárně rozloženou v horní části podle přání zákazníka a účelu, ke kterému bude použit. Každý z dvaceti uzlů v horní části tlumiče byl zatížen silou 80N. Pro provedených nelineárních výpočtech jsme zjistili, že všechny modely tlumiče vykazují při tomto zatížení téměř stejné deformace. Průběhy vypočtených hodnot deformací a napětí získané pomocí numerické metody MKP potvrdily velmi dobrou shodu s experimentálně naměřenými nelineárními hodnotami materiálových charakteristik na zadaných vzorcích hyperelastických pryží. Podle zjištěných nelineárních materiálových charakteristik na vzorcích a srovnáním s vypočtenými nelineárními parametry na modelu se jedná se o relativně "měkké" tlumiče, které jsou určené pro měkké tlumení, při kterém dochází k větším nelineárním deformacím. Pro porovnání byly pro model tlumiče uvažovány materiálové Mooney-Rivlinovy konstanty, které jsou charakteristické pro materiály patřící do kategorie označovaných jako tvrdé pryže. Tento typ materiálu, který jsme uvažovali v našem případě podle literatury [0], vykazuje při stejném zatížení třikrát menší nelineární deformaci než zadané vzorky01-04. Takový typ tlumiče bude vhodný pro "tvrdší" tlumení při větších zatěžovacích silách.

Na závěr můžeme konstatovat, že se vliv jednotlivých materiálových charakteristik pro směs vzorků01-04 v důsledku malých rozdílů naměřených hodnot potvrdil i numerickou analýzou na modelu tlumiče. Tím byla velmi dobře prokázána shoda mezi naměřenými nelineárními hodnotami na vzorcích a jejich aplikací na konkrétní model tlumiče s vypočtenými nelineárními parametry tlumiče pomocí numerické metody. Pro definitivní potvrzení získaných výsledků bude v případě výroby tlumiče nutné provést další měření na

dynamické zkušebně. V tomto případě se jedná se o dlouhodobější, finančně a časově náročné zkoušky, které přesahují rozsah překládané diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [0] KUBÍK, J. a ZYTKA, A. *Zkušební metody v gumárenství*, SNTL Praha, 1962.
- [0] URBAN, P. *Modelování konstrukčních prvků z pryže vyztužené nitěmi*. Liberec. 114 s. Disertační práce na Fakultě strojní na Technické Univerzitě.
- [0] HLATKÝ, Z. *Vulkanizáty s bílými plnivý*. Zlín, 2004. Diplomová práce na Fakultě technologické na Univerzitě Tomáše Bati.
- [0] CIULLO, P. a HEWITT, N. *The rubber formulary*, New York, USA 1999.
- [0] PREKOP, Š. a kol. *Gumárska technológia I.*, EDIS ŽU v Žiline, ISBN 80-7100-483-9, 1998.
- [0] FRANTA, I. *Gumárenské suroviny*, 2.vydání, SNTL Praha, 1969.
- [0] ŠPAČEK, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II* (Skripta), VUT Brno, 1987.
- [0] PERMSKÝ, R. a SAMEC, M. *Gumárenská technologie VIII: Tvrdá pryž*, SNTL Praha, 1968.
- [0] HOLUB, J. *Gumárenská technologie VII: Pryž jako konstrukční materiál*, SNTL Praha, 1967.
- [0] PREKOP, Š. a kol. *Gumárska technológia II*, GC TECH TU v Trenčíně, ISBN 80-88914-85-x, 2003.
- [0] ČSN ISO 37 Stanovení tahových vlastností.
- [0] SCHÄTZ, M. a VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů* (Skripta), Praha, 1978.
- [0] ISO 7619 Stanovení tvrdosti vtlačováním pomocí kapesních tvrdoměrů.
- [0] ČSN 621480 Stanovení odrazové pružnosti na přístroji Schob.
- [0] MEISSNER, B. a ZILVAR, V. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, SNTL Praha, 1987.
- [0] BONET, J., WOOD, R. D. *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis*, Cambridge university press, ISBN 0-521-57272-X, 1997
- [0] BATHE, K. J. *Finite element procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0-13-301458-4, 1996.
- [0] SEKI, W., FUKAHORI, Y., MATSUNAGA, T. *A Large Deformation Finite Element Analysis for Multilayer Elastomeric Bearings*, Rubber chemistry and technology, 1987.
- [0] TAKAYAMA, M., TADA, H. and TANAKA, R. *Finite-element analysis of laminated rubber bearing used in base-isolation system*, Fukuoka university, 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-01, Japan, 1991.

- [0] JOHNSON, A. R., QUIGLEY, C. J. *A Viscohyperelastic Maxwell Model for Rubber Viscoelasticity*, Mechanics and Structures Branch, SLCMT-MRS, Army Materials Technology Laboratory, Watertown, Massachusetts 02172-0001, 1991.
- [0] Samcef User Manual, V.10.1, Samtech 2004, Belgium.
- [0] MORMAN, K. N., PAN, T. Y. *Application of Finite-Element Analysis in the Design of Automotive Elastomeric Components*, Research Staff, Ford Motor Company, 20000 Rotunda Drive, Dearborn, Michigan 48121-2053 and Prodigy, Inc., 2655 Orchard Lake Road, Sylvan Lake, Michigan 48053, 1987.
- [0] KOLÁŘ, V., NĚMEC, I., KANICKÝ, V. *Principy a praxe metody konečných prvků*, Praha, 1997.
- [0] BITTNAR, Z., ŠEJNOHA, J. *Numerické metody mechaniky 1*, ČVUT, Praha, 1992.
- [0] BITTNAR, Z., ŠEJNOHA, J. *Numerické metody mechaniky 2*, ČVUT, Praha, 1992.
- [0] SEGERLIND, L. J. *Applied Finite Element Analysis*, John Willey, New York, 1984.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_0	plocha
$[B]$	transformační matice
$[B]^T$	matice transponovaných operátorů
C_1, C_2	materiálové parametry Mooney-Rivlinova modelu se dvěma parametry
$C_{10}, C_{01}, C_{20}, C_{30}$	materiálové parametry Mooney-Rivlinova modelu se čtyřmi parametry
C_{mn}	materiálový parametr Mooney-Rivlinova modelu
c_1, c_2, c_3	materiálové parametry Yeohova modelu
d	průměr válcového intendoru
$\{d\}$	vektor uzlových posunutí pro celý systém
$[D]$	matice fyzikálních konstant
$[d]^e$	vektor posuvu elementu
${}^T[d]^e$	vektor zobecněných posuvů
$\{d\}^e$	vektor uzlových posunutí elementu
dV	objemový element
$d\Gamma$	definovaná povrchová plošná oblast
E	poměrné prodloužení
E'	modul pružnosti
E_b	tažnost při přetržení
E_s	prodloužení při daném napětí
E_y	prodloužení na mezi kluzu
F	síla
F'	přítlačná síla pružiny
f	funkce druhého invariantu Mooney-Rivlinova modelu
$\{f\}$	vektor výsledných sil v uzlech
${}^T\{f\}^e$	vektor zatížení v uzlech
G	modul pružnosti
G_M	konstanta Mooneyova modelu

h	hloubka vniknutí
H_A	hodnota tvrdosti naměřená na tvrdoměru typu A
H_D	hodnota tvrdosti naměřená na tvrdoměru typu D
H_M	konstanta Mooneyova modelu
I_1, I_2, I_3	hlavní invarianty tenzoru deformace
K	konstanta zahrnující modul pružnosti
$[k]$	matice tuhosti pro celý systém
m	počet elementů
MKP	metoda konečných prvků
$[N]^T$	matice interpolačních funkcí
P	tlakové zatížení
p	Lagrangeův multiplikátor
p_x, p_y, p_z	rozložená zatížení na povrchu
r	počet elementů
S	napětí v tahu
S_y	pevnost na mezi kluzu
TS	pevnost v tahu do okamžiku přetržení
TS_b	pevnost v tahu v okamžiku přetržení zk. tělesa
W	funkce deformační energie
W_0^e	práce vykonaná objemovými silami
W_p^e	práce vykonaná rozloženým zatížením
X^*, Y^*, Z^*	vyjádření objemových sil

α	poměrné prodloužení
α_p	konstanty Ogdenova modelu
$\{\varepsilon_T\}$	přetvoření od teploty
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	hlavní protažení
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	hlavní poměrná přetvoření ve směru os
Γ	oblast zatížení
μ_{MR}	modul pružnosti ve smyku Mooney-Rivlinova modelu
μ_{NH}	modul pružnosti ve smyku Neo-Hookeova modelu
μ_p	parametry Ogdenova modelu
μ_V	modul pružnosti ve smyku Vargova modelu
Π	celková potenciální energie
Π_i	deformační energie vnitřních sil tělesa
Π_z	práce vnějších sil
Π^e	celková potenciální energie elementu
σ	napětí v tahu
σ_1, σ_2	hlavní napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1. GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TAHOVÝCH KŘIVEK [0].....	13
OBR. 2. ZKUŠEBNÍ HROT TVRDOMĚRU TYPU A [0].....	16
OBR. 3. ZKUŠEBNÍ HROT TVRDOMĚRU TYPU D [0].....	16
OBR. 4. TVAR OBOUSTRANNÝCH LOPATEK S OZNAČENÍM PRACOVNÍ ČÁSTI [0]..	22
OBR. 5. VYSEKÁVACÍ NŮŽ PRO ZKUŠEBNÍ TĚLESA OBOUSTRANNÝCH LOPATEK [0].....	23
OBR. 6. ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA POMĚRNÉM PRODLOUŽENÍ PRO VZOREK01.....	25
OBR. 7. ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA POMĚRNÉM PRODLOUŽENÍ PRO VZOREK02.....	25
OBR. 8. ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA POMĚRNÉM PRODLOUŽENÍ PRO VZOREK03.....	26
OBR. 9. ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA POMĚRNÉM PRODLOUŽENÍ PRO VZOREK04.....	26
OBR. 10. LINEARIZACE TAHOVÉ KŘIVKY PRO VZOREK01.....	30
OBR. 11. LINEARIZACE TAHOVÉ KŘIVKY PRO VZOREK02.....	30
OBR. 12. LINEARIZACE TAHOVÉ KŘIVKY PRO VZOREK03.....	31
OBR. 13. LINEARIZACE TAHOVÉ KŘIVKY PRO VZOREK04.....	31
OBR. 14. TLUMIČ – ZÁKLADNÍ GEOMETRIE.....	32
OBR. 15. SÍŤ KONEČNÝCH PRVKŮ.....	33
OBR. 16. OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	38
OBR. 17. ZATÍŽENÍ S NASTAVENOU ČASOVOU FUNKCÍ.....	38
OBR. 18. ROZLOŽENÍ DEFORMACE TLUMIČE V OSE X A Y PRO VZOREK01.....	39
OBR. 19. ROZLOŽENÍ DEFORMACE TLUMIČE V OSE Z PRO VZOREK01.....	39
OBR. 20. DEFORMACE TLUMIČE V JEDNOTLIVÝCH ROVINÁCH	40
OBR. 21. POSUVY V JEDNOTLIVÝCH OSÁCH PŘI DEFORMACI TLUMIČE ZE VZORKU01.....	40
OBR. 22. NAPĚTÍ A POSUVY PRO VZOREK01.....	41
OBR. 23. ROZLOŽENÍ DEFORMACE TLUMIČE V OSE X A Y PRO VZOREK02.....	41
OBR. 24. ROZLOŽENÍ DEFORMACE TLUMIČE V OSE Z PRO VZOREK02.....	42
OBR. 25. NAPĚTÍ A POSUVY PRO VZOREK02.....	42
OBR. 26. ROZLOŽENÍ DEFORMACE A POSUVY V OSE Y PRO VZOREK03.....	43
OBR. 27. ROZLOŽENÍ DEFORMACE A POSUVY V OSE Y PRO VZOREK04.....	43
OBR. 28. ROZLOŽENÍ DEFORMACE TLUMIČE V OSE X A Y PRO TVRDŠÍ PRYŽ.....	44
OBR. 29. ROZLOŽENÍ DEFORMACE TLUMIČE V OSE Z PRO TVRDŠÍ PRYŽ.....	44
OBR. 30. NAPĚTÍ A POSUVY PRO TVRDŠÍ PRYŽ.....	45
OBR. 31. PRŮBĚHY DEFORMAČNÍCH VELIČIN PRO ZATĚŽUJÍCÍ CÍLU 400N.....	45
OBR. 32. POSUVY PRO TVRDŠÍ PRYŽ PŘI ZATÍŽENÍ 400N.....	46
OBR. 33. POROVNÁNÍ TAŽNOSTI A PEVNOSTI V TAHU.....	47

OBR. 34. POROVNÁNÍ TVRDOSTI SHORE A.....	47
OBR. 35. POROVNÁNÍ ODRAZOVÉ PRUŽNOSTI SCHOB.....	48
OBR. 36. POROVNÁNÍ DEFORMACÍ SESTROJENÝCH TLUMIČŮ PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLY.....	48

SEZNAM TABULEK

TAB. I. DÉLKA PRACOVNÍ ČÁSTI OBOUSTRANNÝCH LOPATEK [0].....	22
TAB. II. ROZMĚRY VYSEKÁVACÍCH NOŽŮ PRO ZKUŠEBNÍ TĚLESA TVARU OBOUSTRANNÝCH LOPATEK [0].....	22
TAB. III. HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	27
TAB. IV. HODNOTY TVRDOSTI SHORE A.....	28
TAB. V. HODNOTY ODRAZOVÉ PRUŽNOSTI.....	29
TAB. VI. HODNOTY PARAMETRŮ A MODULŮ PRO VZORKY 01-04.....	31