

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra mechaniky

Bakalářská práce

Identifikace materiálových parametrů nelineárního modelu pro popsání mechanických vlastností korkového kompozitu

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 29.5.2014

Jiří Kocáb

Abstract

Tato práce se zabývá identifikací materiálových parametrů korkového kompozitu, používaného jako součást hybridních kompozitů určených k tlumení vibrací. Na základě provedených experimentů na jednoosý tah, jednoosý tlak a prostý smyk bylo zjištěno chování korkového kompozitu při deformacích do 25%. Jako materiálový model byl vybrán Mooney-Rivlinův zobecněný model v kombinaci s viskoelastickým modelem, definovaným pomocí Pronyho řady. Konečnoprvkové modely, odpovídající provedeným experimentům, byly vytvořeny v programu Abaqus. Identifikace byla provedena pomocí optimalizačního programu Optislang a několika skriptů v jazyce Python. Pomocí numerické optimalizace byl minimalizován rozdíl mezi experimentem a modelem. Výsledkem této práce byly materiálové parametry vhodné k popisu chování korkového kompozitu.

This thesis deals with material parameters identification of cork composite, used as a part of hybrid composites designed for vibration damping. Based on results of conducted experiments, the behaviour of the cork composite during deformations up to 25% was determined. Generalized Mooney-Rivlin material model in combination with viscoelastic model, defined by Prony series, was used as a material model. Finite element models were created in Abaqus. Identification was performed using optimization program Optislang and several scripts in Python. Using numerical optimization, a difference between the experiment and model was minimized. The result of this thesis are material parameters appropriate for describing the behaviour of cork composite.

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Radku Kottnerovi, PhD. za cenné rady, věnovaný čas, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích bakalářské práce.

Použitá značení

symbol	jednotky	název
b_0	m	tloušťka
C_{ij}	Pa	parametr Mooney-Rivlinova modelu
D_i	N	rozdíl sil mezi experimentem a modelem
D_k	Pa ⁻¹	parametr stlačitelnosti Mooney-Rivlinova modelu
$D(t)$	-	creepová funkce
E	Pa	Youngův modul pružnosti
F	N	síla
F^{mod}	N	síla z modelu
F^{exp}	N	síla z experimentu
$max(F_{tah}^{exp})$	N	maximální síla z tahového experimentu
$max(F_{tlak}^{exp})$	N	maximální síla z tlakového experimentu
\mathbf{E}	-	Green-Lagrangeův tenzor deformace
g_1, g_2	-	relaxační součinitele
G	Pa	modul pružnosti ve smyku
I_1, I_2, I_3	-	invarianty deformace
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$	-	invarianty deformace pro stlačitelný hyperelastický materiál
J	-	poměr mezi deformovaným a výchozím objemem.
K, K_0	Pa	elastický modul.
K_∞	Pa	rovnovážný modul.
$K(t)$	-	relaxační funkce
l	m	délka
l_0	m	počáteční délka
Δl	m	prodloužení
m	Kg	hmotnost
n	-	počet
\mathbf{S}	-	2. Piola-Kirchhoffův tenzor napětí
t	s	čas
V	m ³	objem
W	J·m ⁻³	hustota deformační energie
γ	-	zkos
$\dot{\gamma}$	min ⁻¹	rychlost zkosu
ε	-	poměrné prodloužení
$\dot{\varepsilon}$	min ⁻¹	rychlost deformace
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$,	-	hlavní protažení
ν	-	Poissonovo číslo
ρ	Kg·m ⁻³	hustota
τ_1, τ_2, τ_n	s	relaxační časy

Seznam obrázků

3.1	Schéma viskoelastických modelů	9
3.2	Schéma Pronyho řady	10
4.1	Průběh zatěžování	12
4.2	Rozměry tahového vzorku	13
4.3	Tahový vzorek před začátkem měření	14
4.4	Tahový vzorek po zatížení (25% nominální deformace)	14
4.5	Záznam z tahové zkoušky, závislost reakční síly na čase	15
4.6	Záznam z tahové zkoušky, závislost reakční síly na posunutí	15
4.7	Tlakový vzorek před měřením	16
4.8	Rozměry tlakového vzorku	17
4.9	Tlakový vzorek po zatížení (25% nominální deformace)	17
4.10	Záznam z tlakové zkoušky, závislost reakční síly na čase	18
4.11	Záznam z tlakové zkoušky, závislost reakční síly na posunutí	18
4.12	Rozměry a sestavení smykového vzorku	19
4.13	Záznam ze smykové zkoušky, závislost reakční síly na čase	20
4.14	Záznam ze smykové zkoušky, závislost reakční síly na posunutí	20
5.1	Geometrie tahového modelu	23
5.2	Okrajové podmínky tahového modelu	23
5.3	Okrajové podmínky tahového modelu	23
5.4	Konečnoprvková síť tahového modelu	23
5.5	Geometrie a okrajové podmínky tlakového modelu	24
5.6	Konečnoprvková síť tlakového modelu	24
5.7	Geometrie smykového modelu	25
5.8	Okrajové podmínky smykového modelu	25
5.9	Konečnoprvková síť smykového modelu	25
6.1	Porovnávání experimentu a modelu	27
6.2	Průběh optimalizace	28

7.1	Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah	33
7.2	Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah	33
7.3	Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tlak	34
7.4	Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tlak	34
7.5	Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak	35
7.6	Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak	35
7.7	Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak	36
7.8	Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak	36
7.9	Porovnání smykového experimentu a modelu	37
7.10	Porovnání smykového experimentu a modelu	37

Seznam tabulek

4.1	Nominální deformace a tomu odpovídající posunutí v případě tahu	14
4.2	Nominální deformace a tomu odpovídající posunutí v případě tlaku	16
4.3	Zkos, nominální deformace a odpovídající posunutí v případě smyku	19
6.1	Parametry evolučního algoritmu	30
7.1	Identifikované parametry	32

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Současný stav	2
1.2	Cíl	2
2	Korkové kompozity	3
2.1	Historický vývoj	4
2.2	Složky korkových kompozitů	4
3	Materiálové modely	6
3.1	Hyperelasticita	6
3.2	Viskoelasticita	8
3.3	Použitý model	10
4	Experimenty	11
4.1	Průběh zatěžování	11
4.2	Měřené veličiny	12
4.3	Tahová zkouška	13
4.4	Tlaková zkouška	16
4.5	Smyková zkouška	19
5	Numerické simulace	21
5.1	Tah	22
5.2	Tlak	24
5.3	Smyk	25
6	Identifikace	26
6.1	Cílová funkce	26
6.2	Průběh optimalizace	28
6.3	Identifikace	29
7	Výsledky	31
8	Závěr	38

1 Úvod

Kompozitní materiály, fenomén, který nahradí současné konvenční materiály? Kompozitní materiály jsou složené minimálně ze dvou složek (fází), které mají odlišné fyzikální a chemické vlastnosti. Tyto složky jsou obvykle označovány jako matrice a výztuž, které by mělo být více jak 5% celkového objemu. Existuje velké množství dělení kompozitních materiálů, pokud je však rozdělíme podle výztuže, dostaneme dvě základní skupiny. První skupinou jsou vláknové kompozity. Do této skupiny patří uhlíkové, skelné nebo aramidové kompozity, ve kterých jsou vlákna spojena nejčastěji pomocí epoxidové pryskyřice. Tato vlákna mohou být orientována a tím ovlivněny mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Druhou skupinou jsou částicové kompozity, ve kterých jsou malé částice výztuže spojeny pomocí matrice. Částice můžou být orientované či neorientované. Mezi částicové kompozity patří korkový kompozit, složený z korkového granulátu a pryže. Polymerní (pryžová) matrice je vyztužena nahodile orientovaným korkovým granulátem. Pryž je velmi elastický materiál, dosahuje vratných elastických deformací v až stovek procent. Korek je ze 45% tvořen přírodním elastickým polymerem zvaným suberin, který má podobné vlastnosti jako pryž a zajišťuje velkou elasticitu korku.

Zkoumaný korkový kompozit Amorim ACM87 je určený k tlumení vibrací a je možné ho kombinovat s celou řadou dalších materiálů, jako například hliník, ocel, překližka nebo uhlíkové kompozity [1]. Uvedený korkový kompozit byl v práci [13] použit jako součást hybridních kompozitů, určených k tlumení vibrací výrobních strojů. Korkový kompozit byl v případě práce [13] modelován jako lineární elastický materiál. Cílem této práce bylo popsat chování korkového kompozitu pomocí nelineárního materiálového modelu, který lépe postihne jeho chování, a to především při velkých deformacích.

Jako předloha pro návrh experimentů byl použit článek [7], ve kterém byly zkoumány mechanické vlastnosti pryže. Korkový kompozit je z části složen z pryže, a proto mohlo být použito podobných experimentů ke zjištění mechanických vlastností korkového kompozitu. Vzhledem k průběhu prováděných experimentů, ve kterých bylo dosahováno deformací až 25%, musely být vybrány adekvátní materiálové modely, které jsou schopny popsat chování korkového kompozitu při velkých deformacích. K popisu chování pryže se nejčastěji používají hyperelastické a viskoelastické modely, nebo jejich kombinace.

1.1 Současný stav

V současné době je korkový kompozit ACM87 používán především jako součást hybridních kompozitů s tlumícími vlastnostmi. V minulosti byl korkový kompozit zkoumán na Západočeské univerzitě v pracích [13] a [8]. Byly zkoumány tlumící vlastnosti hybridních kompozitů, jejichž součástí byl právě korkový kompozit nebo pryž. Porovnáním tlumících vlastností obou materiálů byly zjištěny lepší tlumící vlastnosti u korkového kompozitu. Podle [8] je poměrný útlum pryže 0,072 a korkového kompozitu 0,112. Korkový kompozit byl v předchozích pracích modelován jako lineární elastický materiál. Další možnosti využití korkového kompozitu jsou uvedeny v následující kapitole.

1.2 Cíl

Cílem této práce byla identifikace materiálových parametrů korkového kompozitu, která se skládala z několika částí.

- V první části této práce bylo potřeba vyšetřit mechanické vlastnosti korkového kompozitu pomocí zkoušek na trhačím stroji.
- Na základě výsledku první části práce bylo potřeba vybrat matematické modely vhodné k popisu vyšetřených mechanických vlastností.
- Po určení mechanických vlastností a modelů potřebných k jejich popisu mohlo být přistoupeno k vytvoření numerických simulací pomocí metody konečných prvků.
- V poslední části práce zbývalo identifikovat materiálové parametry použitých modelů, na základě srovnávání naměřených dat a dat ze simulací.

2 Korkové kompozity

Jako zdroj informací použitých v této kapitole sloužil především článek [6], který se zabývá korkovými kompozity. Dále bylo čerpáno z knihy [10], ve které jsou uvedeny vyčerpávající informace o korku.

Kompozitní materiály, neboli kompozity, jsou složeny ze 2 nebo více složek o různých fyzikálních a chemických vlastnostech. Výsledný kompozit má poté jiné vlastnosti, než by měly jednotlivé složky zvlášť. Korkové kompozity jsou složeny převážně ze dvou složek. První je korkový granulát, druhou složkou je pojivo. Pojivo (matrice) může být na přírodní nebo syntetické bázi. Do některých kompozitů jsou přidávána aditiva pro zlepšení vlastností. V současné době na trhu převažuje použití korku v kombinaci se syntetickými polymery, jako je polyuretan, melamin nebo pryž (guma). Vlastnosti výsledného kompozitu závisí na hrubosti a kvalitě korkového granulátu, objemovém podílu korku a pojiva a také na přidaných aditivech. Korkové kompozity se dají rozdělit podle použitých polymerů na dva základní druhy. První jsou kompozity založené na plastech a druhé na elastomerech.

Výroba korkových kompozitů je poměrně jednoduchá. Ve šroubovém mixeru je smícháván korkový granulát s pojivem a případně dalšími aditivy. Touto směsí jsou následně naplněny ocelové formy. Formy mohou být rozličných tvarů i velikostí, nejčastěji se používají válcové a obdélníkové tvary. Formy s připravenou směsí se vloží do pece a při teplotě 120° C se pečou po dobu 4-22 hodin. Následně jsou kompozitové bloky ochlazeny a nařezány na požadované rozměry.

Kompozity založené na plastech jsou používány především jako krytiny. Nejvyšší kvalitu korkový granulát je používán na výrobu linolea a podobných podlahových krytin. Korkové kompozity používané na podlahy dosahují hustoty okolo 500 kg·m³. Tyto podlahy jsou snadno udržovatelné, odolné a příjemné na chůzi. Kompozity s nižší hustotou jsou používány na obklady stěn, kde slouží jako tepelné a akustické izolátory. Korkové kompozity na bázi pryže se používají především jako tlumiče vibrací, ať jako jednotlivé vrstvy, nebo v kombinaci s jinými materiály. Jejich použití je velmi rozsáhlé: od již zmíněného tlumení vibrací výrobních strojů po použití v kolejové dopravě jako součást dvojkolí u vlaků nebo tramvají. V oblasti stavitelství jsou tyto kompozity používány ke zvukové izolaci. Výborné jsou také jako těsnění do spalovacích motorů.

V současné době existuje nepřehledné množství korkových kompozitů, výše uvedené jsou nejpoužívanější a pro tuto práci důležité. Existují i další druhy korkových kompozitů, ve kterých je použit uhlík, hliník, nebo drť z nápojových kartónů. Tyto kompozity mají podobné vlastnosti i použití jako klasické korkové kompozity.

2.1 Historický vývoj

Jak nejlépe utěsnit nádobu od vína, aby se víno nezkažilo a zároveň nebyla ovlivněna jeho chuť? Tuto otázku si pokládali již staří Řekové. Odpovědí na tuto otázku byla kůra dubu korkového neboli korek. Staří Řekové utěšňovali hliněné nádoby pomocí korkového uzávěru a pryskyřice. Počátkem 17. století byl s rozvojem skleněných lahví korek jako uzávěr znovuobjeven a od té doby jsou korkové uzávěry se skleněnými lahvemi nedílně spojeny. Korkové špunty byly vysekávány z kůry, čímž vznikalo velké množství odpadu, které již nemělo další využití ani hodnotu. Tyto zbytky korku vedly ke zrodu korkových kompozitů. Předchůdcem korkových kompozitů byla směs korkového granulátu a gumy, používaná jako podlahová krytina. První korkový kompozit vznikl v Anglii smícháním korkové drti s přírodním lepidlem, konkrétně se smolou. V průběhu 20. století bylo přírodní lepidlo postupně nahrazováno syntetickými lepidly a v roce 1968 byl poprvé použit korek v kombinaci se syntetickým polymerem, konkrétně polyuretanem. Tato kombinace vedla ke vzniku korkového kompozitu.

2.2 Složky korkových kompozitů

Korek

Korek je materiál získávaný z kůry dubu korkového nebo korkovníku amurského. Dub korkový se vyskytuje pouze v oblasti jižní Evropy a severní Afriky. Převážnou většinu celosvětové produkce korku obstarává Portugalsko (51%) a Španělsko (21%). Kůra se ze stromů odřezává nejdříve po 25 letech od vysazení, poté každých 9-30 let v závislosti na tom, jak kvalitní korek požadujeme. Životní cyklus dubu korkového je okolo 200 let. Korek je přírodní materiál, tudíž je jeho výroba ekologická a trvale udržitelná. Poptávka po korku stále stoupá a během příštích několika let se očekává, že poptávka

převýší nabídku. Z korku se vyrábí různé sportovní pomůcky, jako badmintonové košíčky, rybářské splávky nebo jádra basebalových holí. Další velké uplatnění má korek jako materiál zvyšující tření, například u protiskluzových podložek nebo u spojek motocyklů.

Polymery

Polymery jsou makromolekulární látky složené z dlouhých řetězců atomů. Tyto řetězce se nazývají mery a jsou tvořeny dlouhými, pravidelně se opakujícími částmi. Polymery jsou látky, které mohou vznikat přírodně nebo mohou být uměle vyrobeny (syntetizovány). Na základě jejich vlastností se syntetické polymery dělí na elastomery a plasty. Plasty dále mohou být rozděleny na termoplasty a reaktoplasty [15].

- Elastomery jsou vysoce elastické látky, které bez porušení vydrží i velké deformace. Po odlehčení se rychle vracejí do původní podoby. Tyto materiály jsou známé především jako pryže (gumy).
- Plasty jsou za běžné teploty tvrdé a křehké látky, poddajnými a plastickými se stávají až při vyšší teplotě.
 - Termoplasty jsou látky, které lze opakovaně zahřívat a měnit jejich tvar.
 - Reaktoplasty jsou po zahřátí a následném zchladnutí dále tvarově neměnné.

3 Materiálové modely

V této kapitole budou uvedeny základní materiálové modely vhodné k popisu mechanických vlastností pryže. Materiálové modely budou rozděleny na hyperelastické a viskoelastické. Vzhledem k jisté podobnosti mezi vlastnostmi pryže a vlastnostmi korkového kompozitu byly zvoleny materiálové modely vhodné k popisu pryže. Podstatným rozdílem je však stlačitelnost, která je u pryže téměř nulová, ale u korku tomu tak není. Z [1] je patrné, že korkový kompozit ACM87 je stlačitelný a jsou zde uvedeny další podrobnosti. Korkový kompozit je v této práci uvažován jako izotropní materiál, aby bylo možné použít následující modely.

3.1 Hyperelastická

Hyperelastické (nelinéární elastické) modely jsou časově nezávislé a vztah mezi napětím a deformací je definován pomocí hustoty deformační energie. Napětí je vyjádřeno jako derivace hustoty deformační energie podle deformace. Hustota deformační energie W je vyjádřena pomocí deformačních invariantů I_1 , I_2 , I_3 , které jsou definovány jako [5], [13]:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad (3.1)$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2, \quad (3.2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2. \quad (3.3)$$

Hlavní protažení λ_1 , λ_2 a λ_3 ve směru hlavních os jsou definována jako:

$$\lambda_i = \left(\frac{l_i + \Delta l_i}{l_i} \right) = 1 + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

a poměrná prodloužení ε_i ve směru hlavních os jsou určena vztahem:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.5)$$

kde l_i je počáteční délka a Δl je přírůstek délky.

U dokonale nestlačitelných materiálů platí, že $I_3 = 1$.

neo-Hookovský model

Jedním z nejjednodušších hyperelastických modelů je neo-Hookovský model, který je schopný popisovat deformace do velikosti 40% [5], jehož hustota deformační energie je pro nestlačitelný materiál definována jako:

$$W = C_{10}(I_1 - 3), \quad (3.6)$$

v případě uvažování stlačitelnosti je vztah pro výpočet hustot deformační energie následující:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2, \quad (3.7)$$

kde K je objemový modul, J je poměr mezi objemem před a po deformaci a $\bar{I}_1 = J^{-2/3}I_1$. C_{10} je materiálová konstanta, kterou lze analyticky určit jako polovinu smykového modulu G a vztah pro výpočet hustoty deformační energie W je tedy možné přepsat do tvaru:

$$W = \frac{G}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2. \quad (3.8)$$

Mooney-Rivlinův zobecněný model

Složitějším materiálovým modelem, který se liší v počtu konstant, je Mooney-Rivlinův model, tento model je však pouze jednou z variant zobecněného Mooney-Rivlinova modelu, jinak také nazývaného Polynomiální hyperelastický model. Hustota deformační energie pro nestlačitelný Mooney-Rivlinův zobecněný model je definována jako [11]:

$$W = \sum_{i,j=0}^n C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j, \quad C_{00} = 0, \quad (3.9)$$

v případě uvažování stlačitelnosti je hustota deformační energie definována následovně:

$$W = \sum_{i,j=0}^n C_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i(\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^m D_k(J - 1)^{2k}, \quad C_{00} = 0. \quad (3.10)$$

U stlačitelných variant materiálových modelů se objevuje \bar{I}_1 a \bar{I}_2 . Jsou to přepočtené invarianty hlavních deformací s ohledem na změnu objemu. $\bar{I}_1 = J^{-2/3}I_1$ a $\bar{I}_2 = J^{-4/3}I_2$. C_{ij} a D_k jsou materiálové parametry materiálového

modelu, kde D_k vyjadřují stlačitelnost. Při volbě $n = 1$ a $m = 1$ získáváme základní variantu stlačitelného Mooney-Rivlinova modelu. Pokud zvolíme všechny konstanty $C = 0$ a $C_{10} \neq 0$, vztah se zjednoduší na výše uvedený neo-Hookovský model. Zobecněný Mooney-Rivlinův model je schopný popsat velké deformace, v případě tlaku až 100%, v případě tahu asi 30% [5].

Ogdenův model

Ogdenův model je vhodný k popisu velkých deformací až do hodnot 700%. Na rozdíl od předchozích modelů v tomto modelu přímo nevystupují invarianty deformací, ale přímo hlavní protažení. Hustota deformační energie je vyjádřena vztahem [16]:

$$W = \sum_{p=1}^n \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p}), \quad (3.11)$$

kde n , μ_p a α_p jsou materiálové parametry. Při volbě vhodných parametrů lze Ogdenův model zjednodušit na Mooney-Rivlinův a neo-Hookovský model.

3.2 Viskoelasticita

Viskoelastické materiály jsou kombinací viskózních a elastických materiálů. Dokonale elastické materiály se při harmonickém namáhání po zatížení a následném odlehčení vrátí do původní podoby, veškerá energie dodaná při zatížení je zpětně spotřebována při odlehčení a jejich chování není časově závislé. Viskózní materiály jsou protikladem k elastickým materiálům, při harmonickém namáhání dochází k tečení a veškerá vložená energie je u viskózních materiálů přeměněna na teplo. U viskoelastických materiálů dochází ke kombinaci obou předešlých případů, takže část dodané energie je při harmonickém namáhání přeměněna na teplo a část je využita na odlehčení. Mezi napětím a deformací je určitý fázový posun, který leží v intervalu $(0, 2\pi)$ [14].

Pro popis viskoelastického materiálu jsou používány různé modely, které jsou složeny z pružin a tlumičů. Pružiny reprezentují elasticitu a tlumiče reprezentují viskozitu. Mezi nejjednodušší viskoelastické modely patří Maxwellův (a) a Kelvinův model (b), uvedené na obr. 3.1 [14] [2]. Maxwellův model se skládá ze sériově spojené pružiny a tlumiče, Kelvinův model se

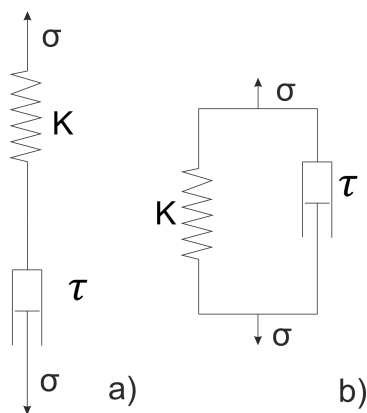
skládá z paralelně spojené pružiny. Složitější modely poté vznikají kombinací více pružin a tlumičů. K popisu chování viskoelastických materiálů je nutné určit relaxační funkci $K(t)$ a creepovou funkci $D(t)$. Jako příklad výpočtu relaxační funkce je uveden vztah (3.12). $K(t)$ je relaxační funkce, K_0 je relaxační modul a τ je relaxační parametr [9].

$$K(t) = K_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.12)$$

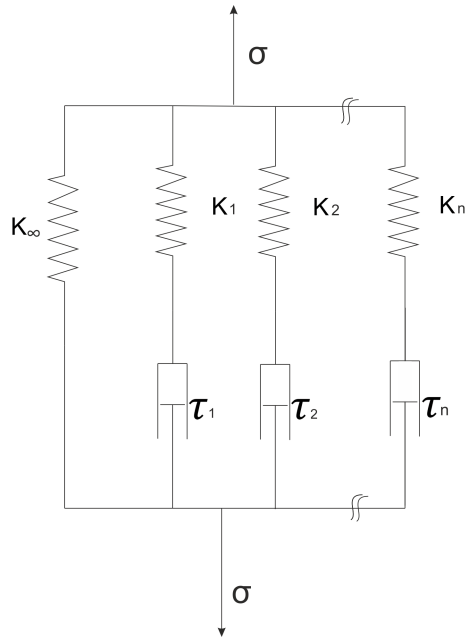
U polymerů je vhodné vyjádřit relaxační funkci pomocí Pronyho řady, která je složena z n paralelně spojených Maxwellových modelů a jedné pružiny. Schéma Pronyho řady je uvedeno na obr. 3.2. Vztah pro výpočet relaxačního modulu pomocí Pronyho řady je následující [9]:

$$K(t) = K_\infty + \sum_{i=1}^n K_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (3.13)$$

kde $K(t)$ je relaxační funkce, K_i jsou relaxační moduly, K_∞ je rovnovážný modul a τ_i jsou relaxační parametry.



Obrázek 3.1: Schéma viskoelastických modelů



Obrázek 3.2: Schéma Pronyho řady

3.3 Použitý model

Použitý materiálový model byl zvolen jako kombinace zobecněného Mooney-Rivlinova hyperelastického modelu a viskoelastického modelu určeného pomocí Pronyho řady. Spojení obou modelů je vyjádřeno následujícím vztahem [12]:

$$\mathbf{S} = \int_0^t K(t - \tau) \frac{d}{d\tau} \frac{\partial W}{\partial \mathbf{E}} d\tau, \quad (3.14)$$

ve kterém je napětí vyjádřeno pomocí 2.Piola-Kirchhoffův tenzoru napětí \mathbf{S} , \mathbf{E} je Green-Lagrangeův tenzor deformace, relaxační modul K je vyjádřený pomocí Pronyho řady (3.13), W je hustota deformační energie vyjádřená podle Mooney-Rivlinova zobecněného modelu (3.10) a τ je integrační proměnná.

4 Experimenty

Prvním krokem této práce bylo vyšetřit mechanické vlastnosti korkového kompozitu pomocí statických zkoušek na stroji Zwick/Roell Z050. K provedení těchto zkoušek bylo potřeba navrhnout a připravit vhodné vzorky. K dispozici byla obdélníková deska korkového kompozitu o tloušťce 2 mm, ze které byly vyřezány vzorky pro jednotlivé zkoušky. Tvar a rozměry těchto vzorků byly částečně převzaty z [3], s ohledem na dostupné množství a tloušťku materiálu. Tyto vzorky byly následně zatěžovány a byla měřena jejich odezva. Jednalo se o zatěžování na jednoosý tah, tlak a prostý smyk.

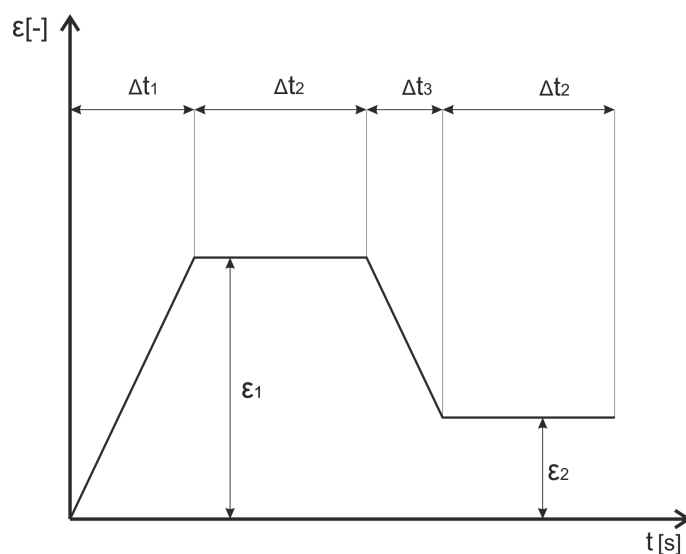
4.1 Průběh zatěžování

Průběh zatěžování byl stejný pro tah a tlak, v případě smyku bylo zatěžováno na menší nominální deformace. Vzorky byly zatěžovány podle obrázku 4.1 a následujícího postupu. Nejprve byly vzorky posuvem zatíženy tak, aby bylo dosaženo 25% nominální deformace, poté následovala relaxační část, dále odlehčení na 10% nominální deformaci a nakonec druhá relaxační část. Tento způsob zatěžování, včetně rychlosti deformace, byl převzat z [7]. Rychlost zatěžování v byla určena tak, aby rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ byly u všech vzorků 0.4 min^{-1} . Ze vztahu (4.1) byly vypočítány rychlosti zatěžování pro tah a tlak, kde l_0 je počáteční délka měřené oblasti, resp. vzorku.

$$v = l_0 \cdot \dot{\epsilon} \quad (4.1)$$

U smykové zkoušky byly použity jiné hodnoty nominální deformace. Vzhledem k významu tenzoru deformace bylo v případě prostého smyku zatěžováno na 30% a 10% zkos, což odpovídá 15% a 5% poměrné deformaci v případě tahu a tlaku ($\gamma = 2\epsilon$). Rychlost zatěžování v byla vypočtena ze vztahu (4.2) tak, aby rychlost deformace $\dot{\epsilon}$ byla 0.4 min^{-1} , jako v případě tahu a tlaku. b_0 je tloušťka smykového vzorku.

$$v = b_0 \cdot \dot{\gamma} = 2 \cdot b_0 \cdot \dot{\epsilon} \quad (4.2)$$



Obrázek 4.1: Průběh zatěžování

- Nominální deformace: $\varepsilon_1 = 25 \%$, $\varepsilon_2 = 10 \%$, v případě smyku $\varepsilon_1 = 15 \%$, $\varepsilon_2 = 5 \%$
- Relaxační čas: $\Delta t_2 = 60 \text{ s}$
- Čas zatěžování $\Delta t_1 = 37,31 \text{ s}$, $\Delta t_3 = 22,38 \text{ s}$, v případě smyku $\Delta t_1 = 22,5 \text{ s}$ a $\Delta t_3 = 15 \text{ s}$

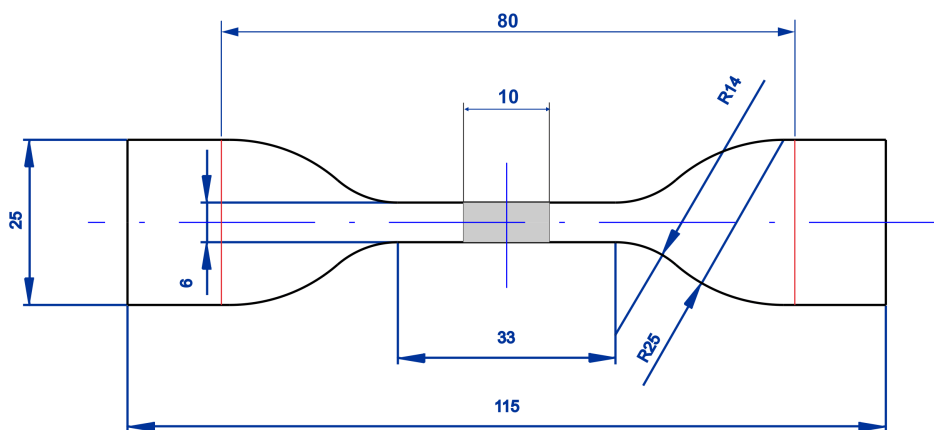
4.2 Měřené veličiny

Výstupem měření na trhacím stroji byl textový soubor se zaznamenaným průběhem měření. Vzorkovací frekvence byla přibližně 50 Hz. Měřené veličiny byly:

- reakční síla [N],
- posuv ramen extenzometru [mm],
- posuv příčnicku trhacího stroje [mm],
- čas [s].

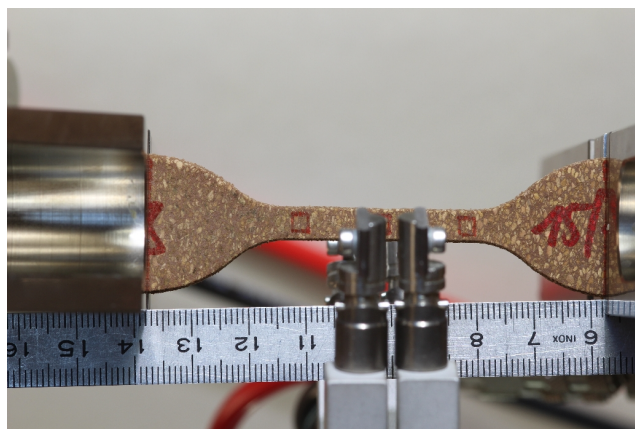
4.3 Tahová zkouška

Pro jednoosý tah byl zvolen vzorek na obr. 4.2. Vzorek byl upnut do čelistí, jejichž počáteční vzdálenost byla 80mm. Aby bylo měření přesnější, byla měřena odezva pouze na šedé, 10 mm dlouhé oblasti za pomoci extenzometru. Měřící ramena extenzometru byla na začátku měření upevněna 5mm od středu vzorku, na hranici šedé oblasti, vyznačené na obrázku 4.2. Tvar vzorku byl zvolen jako takzvaný "dogbone", který díky svému tvaru předchází koncentraci napětí způsobené upnutím do čelistí trhačického stroje a zajišťuje rovnoměrné rozložení napětí a deformace na měřené oblasti. Na obrázku 4.3 je zobrazen tahový vzorek před připnutím ramen extenzometru. Červené čtverce slouží k přibližnému experimentálnímu určení Poissonova čísla ν . Na obr. 4.3 je zobrazen zatížený tahový vzorek.



Obrázek 4.2: Rozměry tahového vzorku

Jak již bylo řečeno v předchozí části, odezva vzorku byla měřena jen na 10 mm dlouhé oblasti ve středu vzorku, vyznačené na obrázku 4.2, proto se i způsob zatěžování odvíjel pouze od této oblasti. Délka měřené oblasti l_0 je 10 mm. Rychlost zatěžování a samozřejmě i velikost posuvu byly vztaženy na extenzometr. Rychlost zatěžování byla vypočtena ze vztahu (4.1) a je rovna 4 mm/min. V tabulce 4.1 jsou číselně uvedeny nominální deformace vyznačené na obrázku 4.1.



Obrázek 4.3: Tahový vzorek před začátkem měření

Tabulka 4.1: Nominální deformace a tomu odpovídající posunutí v případě tahu

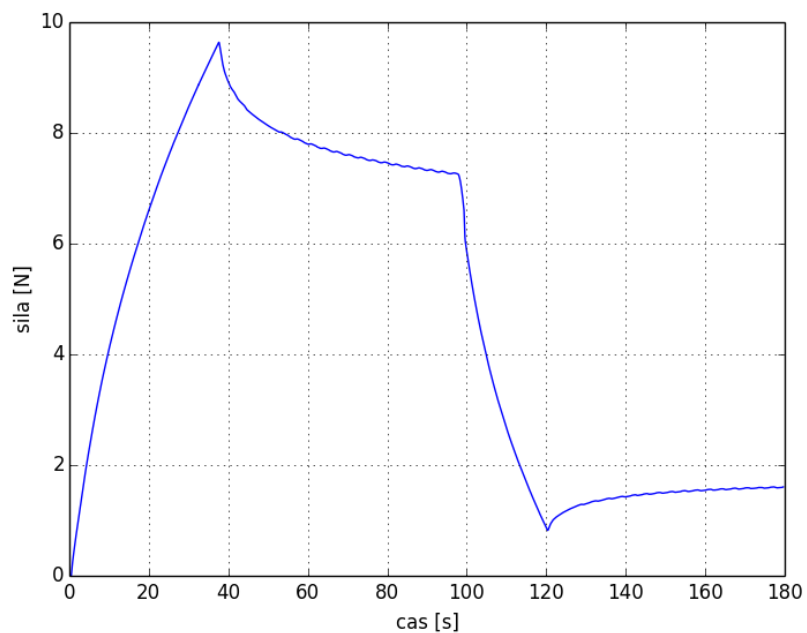
ε [%]	ε [-]	Δl [mm]
0	0	0
10	0,1	0,1
25	0,25	0,25

Výsledky měření

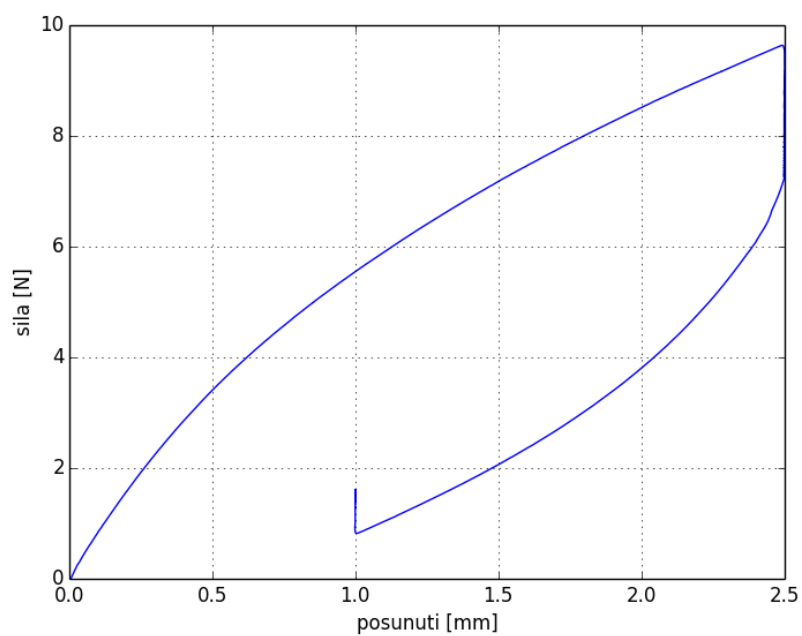
Na obrázku 4.4 je uveden zatížený tahový vzorek s připnutými rameny extenzometru. Na obrázcích 4.5 a 4.6 je zobrazen průběh tahové zkoušky.



Obrázek 4.4: Tahový vzorek po zatížení (25% nominální deformace)



Obrázek 4.5: Záznam z tahové zkoušky, závislost reakční síly na čase



Obrázek 4.6: Záznam z tahové zkoušky, závislost reakční síly na posunutí

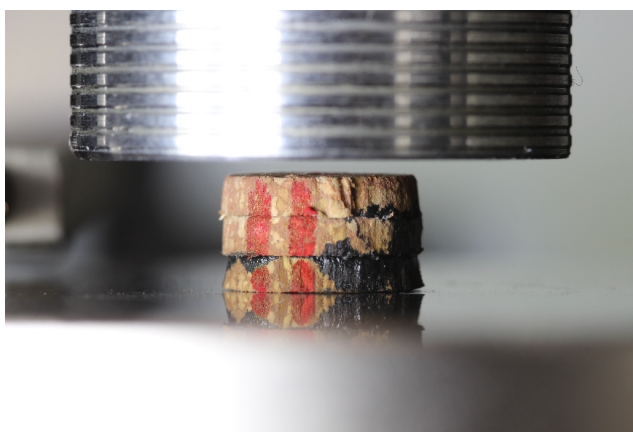
4.4 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška byla provedena podobně jako zkouška tahem. Dostupný materiál měl tloušťku pouze 2 mm, měření na tomto vzorku vykazovalo problémy s přesným dosednutím čelistí, a tím vznikaly nepřesnosti. Proto bylo rozhodnuto, že bude potřeba použít vzorek o větší tloušťce. Materiál o větší tloušťce se nepodařilo získat, a tak byly slepeny 3 dostupné, 2 mm tlusté vzorky, pomocí lepidla Loctite 480. Vzorek použitý na tlakovou zkoušku je zobrazen na obrázcích 4.7 a 4.8.

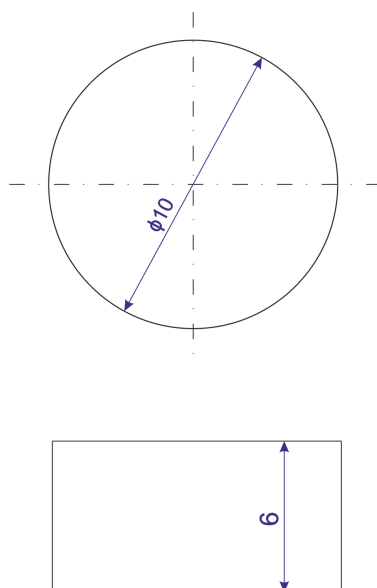
Zatěžování tlakového vzorku opět probíhalo podle obrázku 4.1. Vzorek o tloušťce 6 mm byl stlačován podle výše popsaného předpisu. Extenzometr byl umístěn pod horní čelistí trhacího stroje, aby bylo dosaženo co největší přesnosti měření. Počáteční délka l_0 byla rovna výšce tlakového vzorku, která odpovídala i počáteční vzdálenosti čelistí trhacího stroje. Rychlost zatěžování v , vztažená k posuvu horní čelisti, byla vypočtena ze vztahu (4.1) a je rovna 2,4 mm/min. V tabulce 4.2 jsou uvedeny nominální deformace a jim odpovídající posunutí.

Tabulka 4.2: Nominální deformace a tomu odpovídající posunutí v případě tlaku

ε [%]	ε [-]	Δl [mm]
0%	0	0
10%	0,1	0,6
25%	0,25	1,5



Obrázek 4.7: Tlakový vzorek před měřením



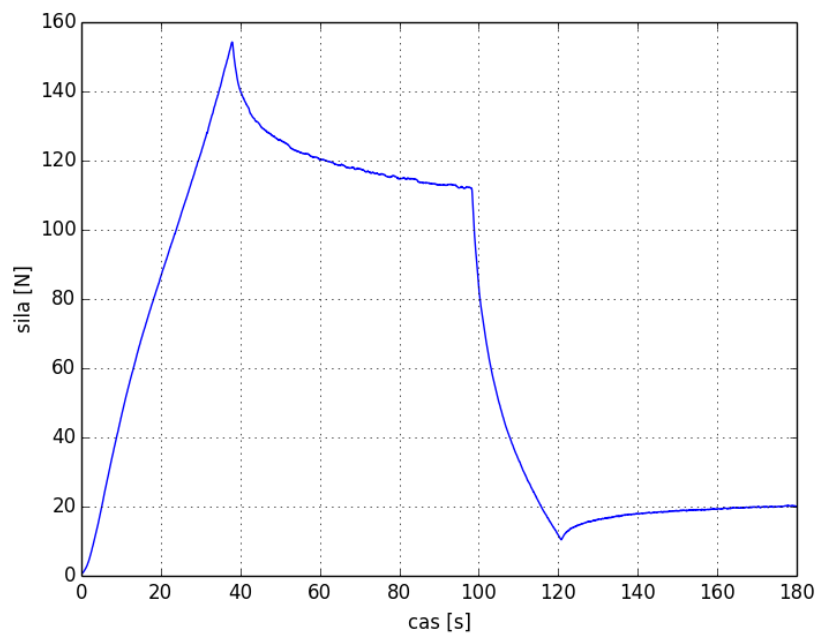
Obrázek 4.8: Rozměry tlakového vzorku

Výsledky měření

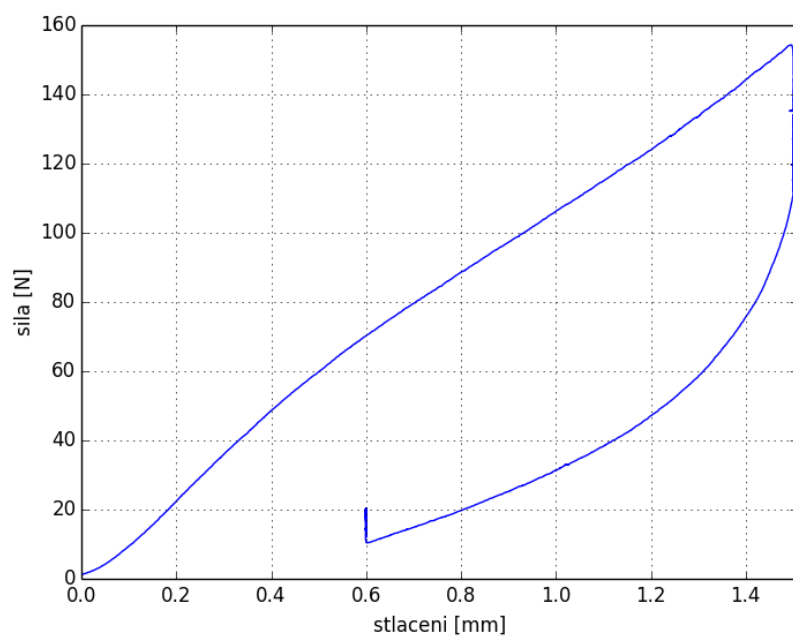
U měřeného vzorku můžeme vidět charakteristické boulení, které je způsobeno třením mezi čelistmi a vzorkem. Zatížený vzorek je zobrazen na obrázku 4.9. Boulení je zde zkuslené kvůli slepení 3 vzorků, jejichž tvar není přesně válcový. Vzorky byly vyřezány pomocí vodního paprsku, který nebyl schopen vyříznout válec, ale došlo zde ke zkosení a průměry podstav nejsou totožné. U měřeného vzorku by mělo docházet k tvorbě pravidelného soudkovitého tvaru. Na obrázcích 4.10 a 4.11 je zobrazen průběh tlakové zkoušky.



Obrázek 4.9: Tlakový vzorek po zatížení (25% nominální deformace)



Obrázek 4.10: Záznam z tlakové zkoušky, závislost reakční síly na čase

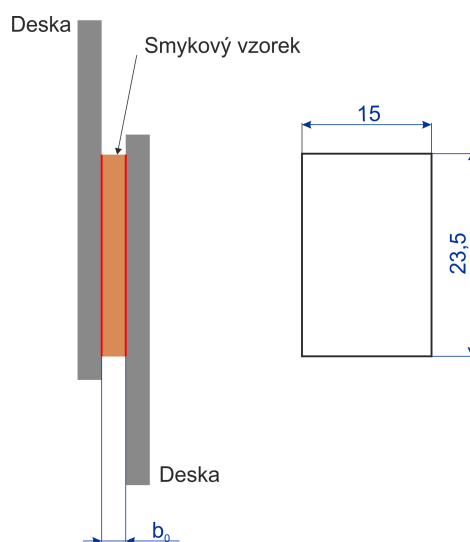


Obrázek 4.11: Záznam z tlakové zkoušky, závislost reakční síly na posunutí

4.5 Smyková zkouška

K přípravě smykové zkoušky bylo potřeba nalepit smykový vzorek na ocelové desky, jak je zobrazeno na obr. 4.12, oblast lepení je zobrazena červeně. Lepení bylo provedeno pomocí lepidla Loctite 480.

Nalepený vzorek byl za desky upnut do čelistí trhacího stroje a zatěžován posuvem jako při tahové zkoušce, tím docházelo k namáhání na smyk ve vzorku z korkového kompozitu. Vzdálenost ocelových desek byla konstantní po celou dobu trvání zkoušky. Počáteční tloušťka smykového vzorku b_0 byla 2 mm. Rychlost zatěžování v byla vypočtena ze vztahu (4.2) a je rovna 1,58 mm/min. Rychlost zatěžování a velikost posunutí byla vztažena k posuvu ocelové desky měřené extenzometrem.



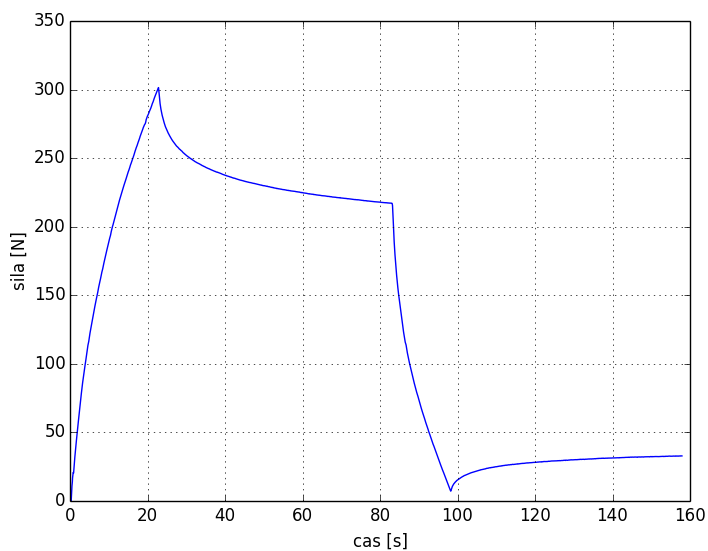
Obrázek 4.12: Rozměry a sestavení smykového vzorku

Tabulka 4.3: Zkos, nominální deformace a odpovídající posunutí v případě smyku

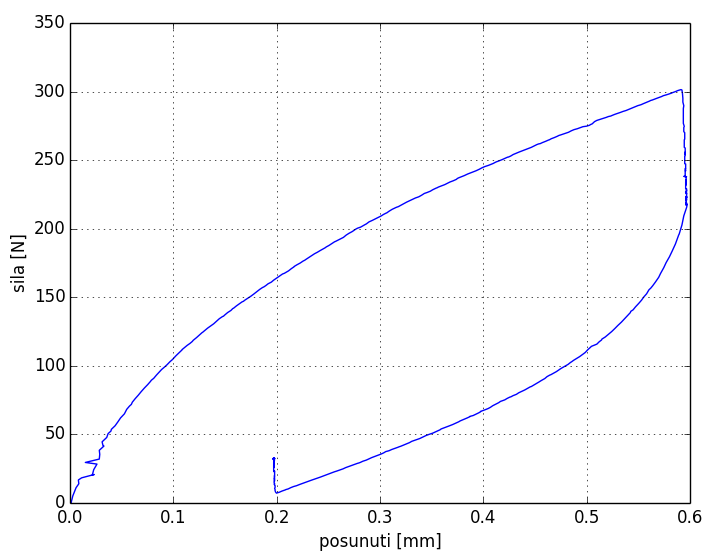
γ [%]	ε [%]	Δl [mm]
0	0	0
10	5	0,2
30	15	0,6

Výsledky měření

Na obrázcích 4.13 a 4.14 je zobrazen průběh smykové zkoušky.



Obrázek 4.13: Záznam ze smykové zkoušky, závislost reakční síly na čase



Obrázek 4.14: Záznam ze smykové zkoušky, závislost reakční síly na posunutí

5 Numerické simulace

K tvorbě a následnému výpočtu MKP modelů byl použit software Abaqus. MKP modely byly tvořeny plně parametricky pomocí skriptů v jazyce Python, což umožňovalo měnit parametry modelu pouhou změnou hodnot v textovém souboru. Možnost jednoduše měnit parametry modelů byla stěžejní pro následnou identifikaci materiálových parametrů. Při vytváření numerických simulací bylo důležité vytvořit MKP modely odpovídající měřeným vzorkům. Musel být dodržen tvar, rozměry a způsob zatěžování, aby mohly být v další části práce porovnány modely a experimenty. Pro urychlení simulací a zjednodušení modelů byly uvažovány geometrické symetrie jednotlivých modelů. Výstupem jednotlivých simulací je velikost posunutí zatěžované oblasti, velikost reakční síly ve směru zatěžování a čas trvání zkoušky.

Jako materiálový model byla zvolena kombinace Mooney-Rivlinova modelu pro stlačitelný materiál a viskoelastického modelu určeného pomocí Pronyho řady. Mooney-Rivlinův model byl použit 3. řádu (3.10) a obsahuje 12 parametrů, z nichž bylo použito maximálně 8, zbytek byl nulový. Pronyho řada se skládala ze 2 členů (3.13), pro každý člen bylo nutné určit 2 parametry a 1 byl nulový. V celkovém součtu byl tedy materiál popisován 12 parametry, které bylo potřeba identifikovat. Tyto parametry byly: $C_{10}, C_{01}, C_{11}, C_{20}, C_{30}, D_1, D_2, D_3, g_1, g_2, \tau_1, \tau_2$. Materiál byl uvažován homogenní a izotropní.

5.1 Tah

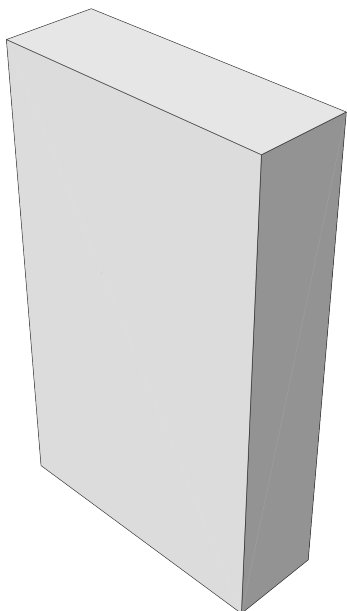
Při tvorbě geometrie tahového modelu bylo provedeno několik zjednodušení. Již samotné měření bylo prováděno na vybrané oblasti ve středu vzorku, zobrazené na obrázku 4.2, a proto byl i MKP model zjednodušen na tuto oblast ve tvaru kvádru, která zároveň umožňuje lépe definovat okrajové podmínky. Kvádr je symetrický podle rovin xy , xz a yz , jak je vidět na obrázku 5.3. Na základě vyznačené symetrie je možné MKP model zjednodušit na 1/8 skutečného modelu, jak je ukázáno na obr. 5.3. Tahový model byl modelován pomocí 3D lineárních prvků, tyto elementy jsou zobrazeny na obr. 5.4.

Definované okrajové podmínky jsou zobrazené na obr. 5.2. Bylo zde užito dvou okrajových podmínek, první bylo zakázání posuvu v určitém směru a druhou zatížení posuvem. Model byl zatěžován ve směru osy y na tmavě červené ploše, vyznačené na obr. 5.2.

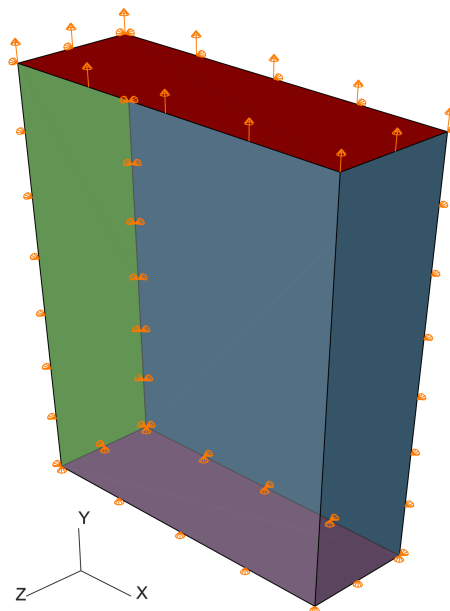
Při vytváření okrajových podmínek byla nejprve definována symetrie. Abaqus umožňuje nastavení okrajové podmínky symetrie, na jejímž základě jsou automaticky přepočítávány hodnoty pro celý model. Ukázalo se, že přepočítání hodnot nebylo ve všech případech správné, a tak byly tyto okrajové podmínky nahrazeny zakázáním posuvu ve směru kolmém na rovinu symetrie. Pro jednotlivé stěny modelu zobrazeného na obr. 5.2 tedy platí:

- uzly modré stěny, ležící v rovině xy , mají zakázaný posuv ve směru osy z ,
- uzly fialové stěny, ležící v rovině xz , mají zakázaný posuv ve směru osy y ,
- uzly zelené stěny, ležící v rovině yz , mají zakázaný posuv ve směru osy x .

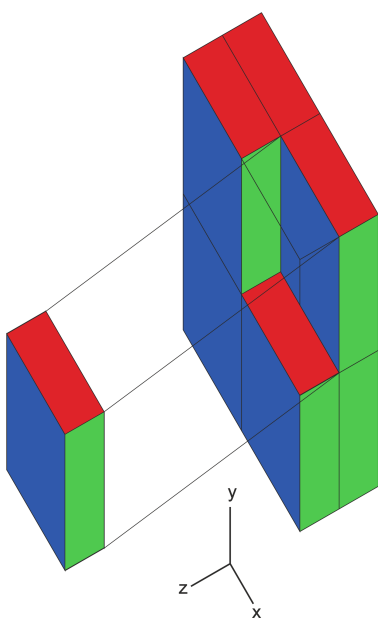
Z aplikace těchto okrajových podmínek vyplývá, že reakční síla ve směru zatěžování, působící na spodní podstavě modelu musí být přepočítána, stejně tak hodnota posuvu. Aplikací symetrie byl získán model, který měl 4× menší průřez v rovině kolmé na směr zatěžování a 2× menší délku ve směru zatěžování. Výsledná reakční síla byla tedy 4x větší a předepsaný posuv byl poloviční oproti nezjednodušenému modelu.



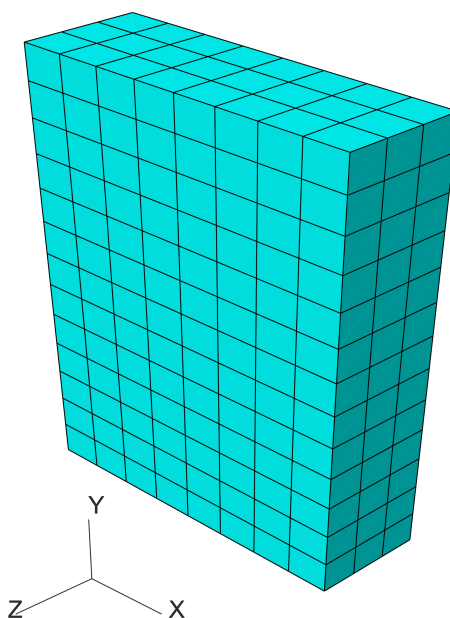
Obrázek 5.1: Geometrie tahového modelu



Obrázek 5.2: Okrajové podmínky tahového modelu



Obrázek 5.3: Okrajové podmínky tahového modelu



Obrázek 5.4: Konečnoprvková síť tahového modelu

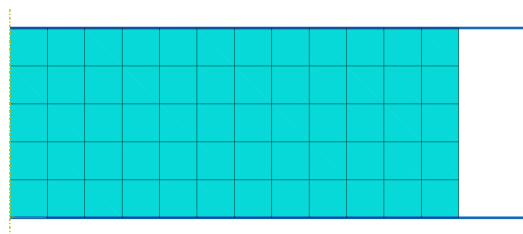
5.2 Tlak

Tvorba tlakového modelu byla komplikovanější než v předchozím případě. Bylo třeba vymodelovat namáhaný vzorek a dvě čelisti, které tento vzorek stlačují. Jak bylo uvedeno v kapitole experimenty, mezi čelistmi a vzorkem vzniká tření, které způsobuje boulení vzorků a v modelu ho nelze zanedbat. Vzhledem k rotační symetrii vzorku bylo možné tlakový model zjednodušit a modelovat ho jako axisymetrický. Toto zjednodušení opět snížilo výpočetní náročnost. Modelována byla pouze polovina příčného řezu, jejíž rotací okolo svislé osy by vznikl celý model. Na obr. 5.5 je tento model včetně čelistí zobrazen. Čelisti byly modelovány jako nedeformovatelná tělesa. Dále byl vytvořen kontakt mezi čelistmi a stlačovaným vzorkem. V tomto kontaktu bylo zapotřebí zadat tření mezi jednotlivými materiály. Hodnota tření byla použita 0.4 stejně jako v [7]. Vzhledem k axisymetrii byl tlakový model modelován pomocí lineárních 2D prvků, které jsou zobrazeny na obr. 5.6.

Okrajové podmínky byly v případě tlaku definovány pouze dvě, první bylo zakázání všech posuvů dolní čelisti a druhou okrajovou podmínkou byl předepsaný posuv pro horní čelist ve směru zatěžování, tj. osy z , jak je ukázáno na obr. 5.5.



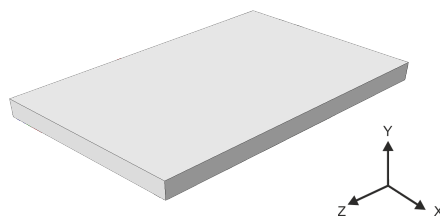
Obrázek 5.5: Geometrie a okrajové podmínky tlakového modelu



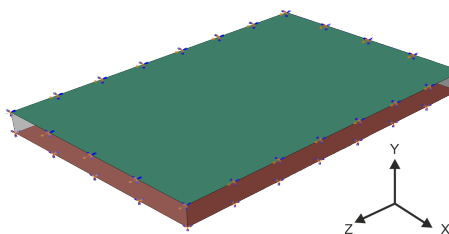
Obrázek 5.6: Konečnoprvková síť tlakového modelu

5.3 Smyk

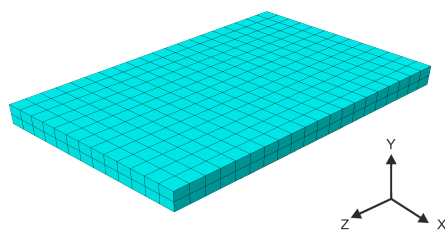
Jako poslední byl vytvořen model smyku. Opět zde došlo ke zjednodušení oproti experimentu. Byl namodelován smykový vzorek daných rozměrů, bez ocelových čelistí zobrazených na obr. 5.7. Okrajové podmínky byly aplikovány na horní a dolní podstavu, jak je zobrazeno na obr. 5.8. Dolní, červeně označené podstavě vzorku byly zakázány posuvy ve všech směrech, což simulovalo přilepení na ocelovou desku. Horní zelené podstavě byl předepsán posuv ve směru osy z a zakázán posuv v osách x a y . Smykový model byl modelován pomocí 3D lineárních prvků, které jsou vyznačeny v konečnoprvkové síti na obr. 5.9.



Obrázek 5.7: Geometrie smykového modelu



Obrázek 5.8: Okrajové podmínky smykového modelu



Obrázek 5.9: Konečnoprvková síť smykového modelu

6 Identifikace

Cílem práce bylo identifikovat parametry nelineárního materiálového modelu. Identifikace byla založena na porovnávání hodnot z experimentů a modelů. Aby bylo dosaženo shody mezi modelem a experimentem, bylo nutné najít vhodné materiálové parametry modelu. Tyto parametry byly hledány pomocí numerické optimalizace. K numerické optimalizaci byl použit program Optislang 3.0, který umožňuje provádět numerickou optimalizaci pomocí řady algoritmů. V této práci byly použity evoluční a gradientní algoritmy. Veškeré obslužné skripty byly napsány v programovacím jazyce Python a dále bylo použito několik textových dávkových souborů. Optimalizace byla provedena na tah, tlak a jejich kombinaci.

6.1 Cílová funkce

Porovnávání modelů a experimentů bylo založeno na rozdílech průběhů reakční síly na čase, jak je zobrazeno na obr. 6.1. Grafy závislostí byly proloženy kubickým splinem a rozděleny na n časových hladin. V každé časové hladině i byla podle vztahu (6.1) vypočtena chyba mezi experimentem a modelem. F_i^{exp} značí hodnotu síly z experimentu v dané časové hladině, F_i^{mod} značí hodnotu síly z modelu v dané časové hladině.

$$D_i = \sqrt{(F_i^{exp})^2 - (F_i^{mod})^2} \quad (6.1)$$

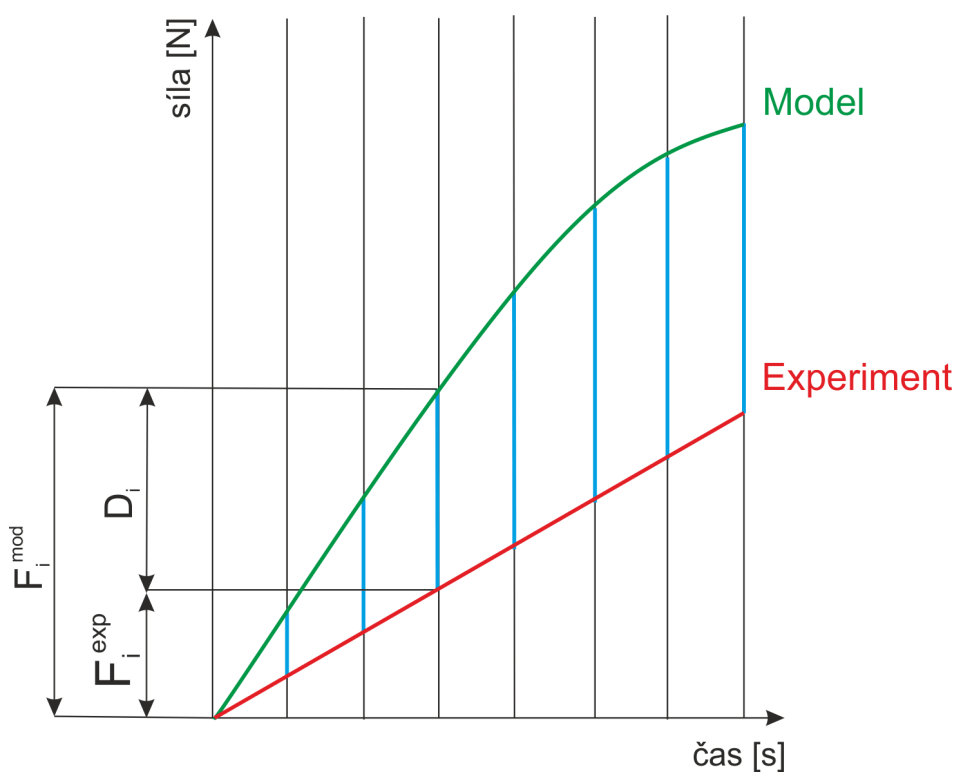
Aby mohla být použita numerická optimalizace, bylo potřeba definovat cílovou funkci f . Cílová funkce f byla funkcí materiálových parametrů a byla definována jako součet chyb ve všech časových hladinách daného porovnávání pomocí vztahu 6.1 jako:

$$f = \sum_{i=1}^n \sqrt{(F_i^{exp})^2 - (F_i^{mod})^2}. \quad (6.2)$$

Vzhledem k identifikaci materiálových parametrů na tah i tlak zároveň bylo potřeba získávat poměrově stejnou chybu z tahu i tlaku. Proto byl v případě identifikace na tah i tlak zároveň vztah 6.2 upraven do následujícího tvaru:

$$f = \frac{1}{\max(F_{tah}^{exp})} \sum_{i=1}^{n_{tah}} \sqrt{(F_{i,tah}^{exp})^2 - (F_{i,tah}^{mod})^2} + \frac{1}{\max(F_{tlak}^{exp})} \sum_{i=1}^{n_{tlak}} \sqrt{(F_{i,tlak}^{exp})^2 - (F_{i,tlak}^{mod})^2}, \quad (6.3)$$

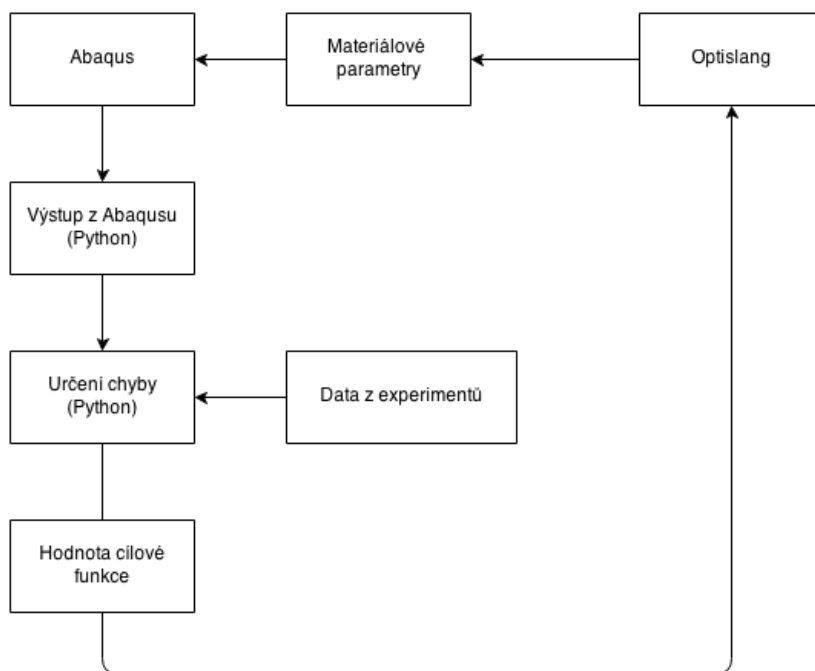
kde indexy tah a tlak označují příslušné porovnání a $\max(F^{exp})$ je maximální hodnota síly v daném experimentu. Tento vztah zajistil, že při optimalizaci byla kladena stejná váha na chybu z tahu i tlaku.



Obrázek 6.1: Porovnávání experimentu a modelu

6.2 Průběh optimalizace

Numerická optimalizace byla řízena programem Optislang. Vstupem programu bylo 12 intervalů, ve kterých se mohly nacházet hodnoty jednotlivých materiálových parametrů. Dále bylo potřeba vybrat vhodný algoritmus pro danou optimalizační úlohu a nastavit jeho parametry. Průběh optimalizace je zobrazen na obr. 6.2 a probíhá následovně. Po spuštění optimalizace program Optislang pomocí daného algoritmu určí materiálové parametry, které předá programu Abaqus. Abaqus vytvoří MKP model, načte získané materiálové parametry a provede simulaci. Výstupem simulace jsou hodnoty reakční síly, posunutí a času. Následně je pomocí skriptu a vztahů 6.2 a 6.3 vypočtena hodnota cílové funkce, která je zpět předána programu Optislang. Optislang na základě hodnot cílové funkce upravuje průběh optimalizace a hledá její minimum. Výstupem optimalizace jsou materiálové parametry.



Obrázek 6.2: Průběh optimalizace

6.3 Identifikace

Dříve než mohla být provedena samotná numerická optimalizace bylo nutné zjistit, v jakých intervalech se mohou pohybovat dané materiálové parametry. V případě použití základního Mooney-Rivlinova modelu, který obsahuje pouze parametry C_{10} , C_{01} a D_1 , je možné určit součet C_{10} a C_{01} a D_1 ze znalosti modulu pružnosti v tahu E a Poissonova čísla ν [4].

$$C_{10} + C_{01} = \frac{E}{6} \quad (6.4)$$

$$D_1 = \frac{1 - 2\nu}{C_{10} + C_{01}} \quad (6.5)$$

Na základě hodnot $E = 2,5$ MPa a $\nu = 0,3$ uvedených v práci [13] a vztahů (6.4) a (6.5) bylo možné přibližně vyjádřit součet parametrů $C_{10} + C_{01}$ a parametr D_1 .

$$C_{10} + C_{01} = 0.417 \text{ MPa}$$

$$D_1 = 9,6 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$$

Tyto hodnoty byly použity k přibližnému určení intervalů, ve kterých mají být materiálové parametry hledány. Ostatní hodnoty nelze jednoduše určit a intervaly, ve kterých mají být hledány další parametry, byly nejprve určeny podle [7]. Pokud optimalizace nekonvergovala, byl zvětšen nebo zmenšen rozsah. V závislosti na výsledcích identifikace byly tyto intervaly upravovány.

Téměř u všech optimalizací se osvědčil postup použití evolučního algoritmu, který našel nejvhodnější kombinaci, a tato kombinace byla dále zpřesňována gradientním algoritmem. Použití samotného gradientního algoritmu nevedlo k výsledku. Parametry evolučního algoritmu jsou uvedeny v tabulce 6.1. Takto nastavené parametry vedly k rychlé konvergenci.

Nejprve byla provedena identifikace pouze na tah, která byla provedena pomocí evolučního algoritmu a následně zpřesněna pomocí gradientního algoritmu. V případě této identifikace nebyl takový problém nalézt vhodná nastavení optimalizace. Identifikace na tlak vycházela z nejlepšího výsledku parametrů pro tah, kde byly jako výchozí hodnoty gradientní metody zadány právě hodnoty z tahu. Gradientní metoda konvergovala ke shodě, která

však byla horší než u tahu. Lepší shody než v tomto případě se nepodařilo dosáhnout. Jako poslední bylo třeba identifikovat kombinaci tahu a tlaku zároveň, aby byl materiálový model použitelný k popisu chování skutečného materiálu, který může být namáhán více jak jedním typem zatížení. Váha tahu i tlaku byla stejná, celková chyba byla rovnoměrně ovlivňována tahem i tlakem. Opět byl nejprve použit evoluční a posléze gradientní algoritmus.

Identifikace parametrů u smyku nebyla prováděna, protože při identifikaci parametrů u pryže [7] bylo zjištěno, že při shodě tahu i tlaku odpovídá i smyk. Tento předpoklad se však nepotvrdil.

Tabulka 6.1: Parametry evolučního algoritmu

parametr	hodnota
velikost populace	300-500
maximální počet generací	100
hodnotící metoda	lineární
počet rodičů	10-50
výběrová metoda	turnajový výběr
velikost turnaje	4-8

7 Výsledky

V této kapitole jsou zobrazeny výsledky identifikace materiálových parametrů. V tabulce 7.1 jsou uvedeny identifikované parametry. Dále jsou uvedeny závislosti síly na čase a síly na posunutí, ve kterých je zobrazena shoda mezi modelem a experimentem. Jsou řazeny postupně, 2 grafy z tahové identifikace, 2 grafy z tlakové identifikace a nakonec 4 grafy z kombinované identifikace.

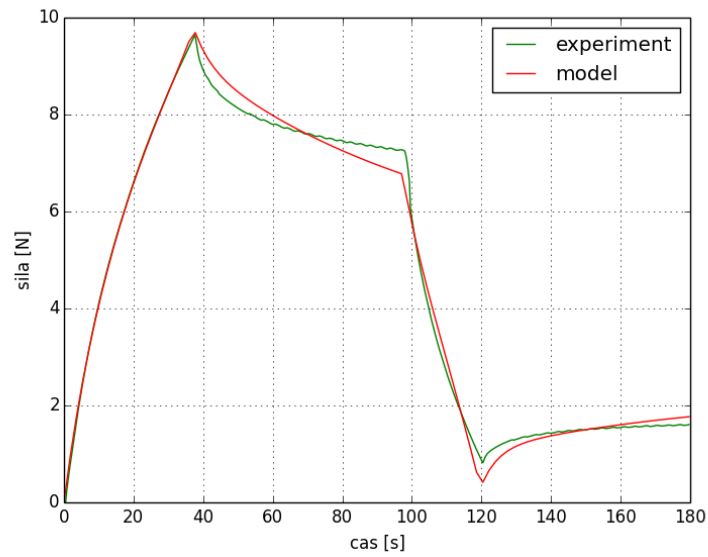
Nejlepší shody bylo dosaženo v případě identifikace na tah (obr. 7.1 a 7.2), kde jsou hodnoty z modelu a experimentu velmi podobné. Dobré shody bylo dosaženo i v případě identifikace na tlak (obr. 7.3 a 7.4), s výjimkou poslední části experimentu, kde dochází k horší shodě mezi hodnotami z modelu a experimentu. Poslední částí práce bylo identifikovat materiálové parametry na kombinaci tahu a tlaku, aby bylo možné popsat chování obecně zatíženého materiálu. Výsledky kombinované identifikace jsou uvedeny na obr. 7.5 až 7.8. Bylo opět dosaženo dobré shody, v případě tahové zkoušky byla shoda lepší než v případě tlakové zkoušky. V závěrečné části experimentů byla shoda horší v obou případech.

Před započítím práce se předpokládalo, že se korkový kompozit bude chovat podobně jako pryž, u které se prokázalo, že pokud jsou dobře identifikovány materiálové konstanty v tahu a tlaku, odpovídá i smyk. Tento předpoklad se bohužel nepotvrdil, jak je vidět z obr. 7.9 a 7.10. Tuhost modelu vychází přibližně poloviční než v případě provedeného experimentu. V případě modelu smyku byly použity parametry z identifikace na kombinaci tahu a tlaku. V případě použití parametrů ze samotného tahu nebo tlaku bylo dosaženo velmi podobných výsledků.

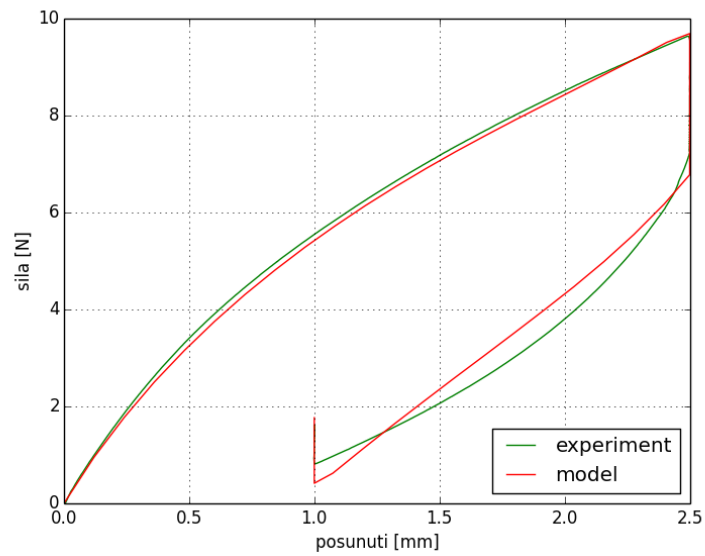
Tabulka 7.1: Identifikované parametry

Parametr	tah	tlak	tah a tlak
C_{01} [Pa]	505486	584193	329148
C_{10} [Pa]	-151436	29218	146750
C_{11} [Pa]	919	-843060	384062
C_{20} [Pa]	-260372	920664	-310499
C_{30} [Pa]	549248	571609	490607
g_1 [-]	0,3490	0,4962	0,4128
τ_1 [s]	4,86	4,86	5,31
g_2 [-]	3,1960	0,2229	0,2402
τ_2 [s]	72,40	16,27	29,63
D_1 [Pa ⁻¹]	$9,75 \times 10^{-7}$	$2,85 \times 10^{-7}$	$3,51 \times 10^{-7}$
D_2 [Pa ⁻¹]	15,94	$3,20 \times 10^{-7}$	0,67
D_3 [Pa ⁻¹]	20,00	$1,82 \times 10^{-5}$	2,91

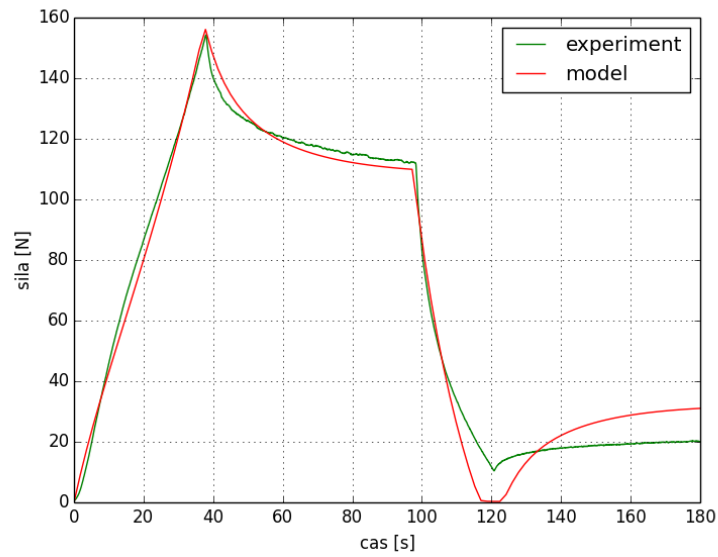
Parametry C a D uvedené v tabulce 7.1 přísluší Mooney-Rivlinovu modelu. C vyjadřují parametry nestlačitelného modelu, D jsou parametry stlačitelnosti. τ_1 , τ_2 g_1 a g_2 jsou parametry Pronyho řady. τ vyjadřují relaxační časy a g jsou relaxační součinitele.



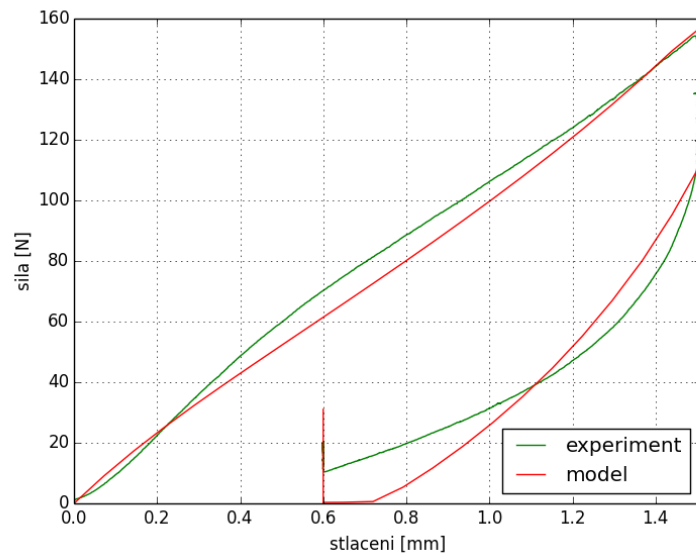
Obrázek 7.1: Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah



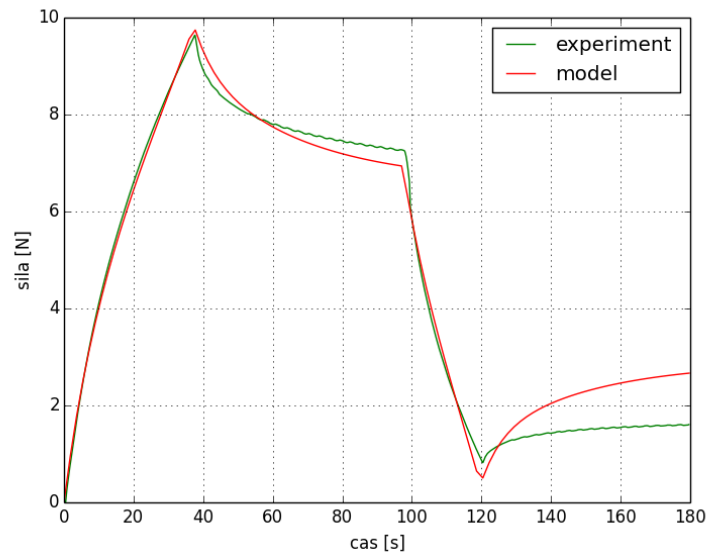
Obrázek 7.2: Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah



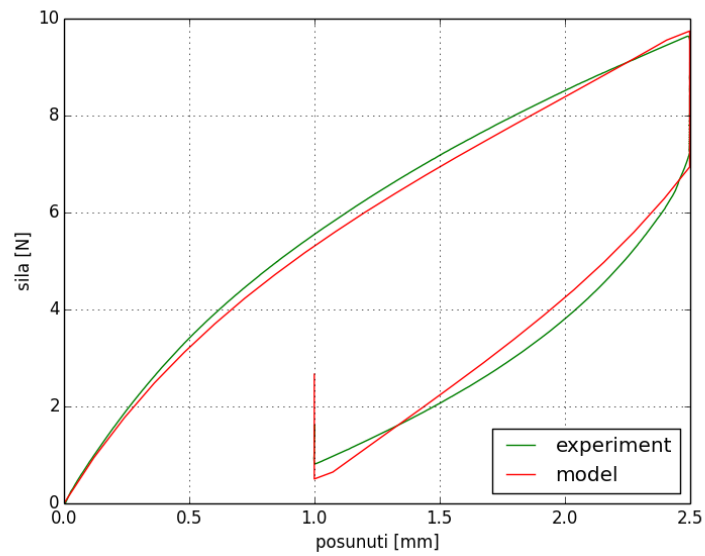
Obrázek 7.3: Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tlak



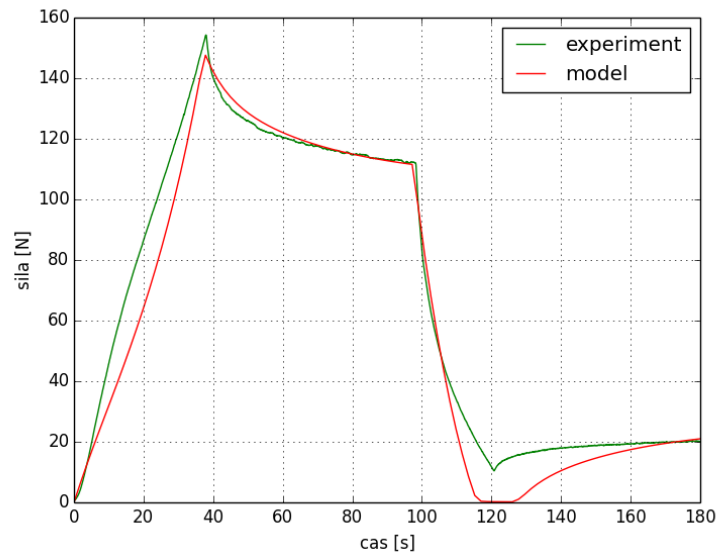
Obrázek 7.4: Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tlak



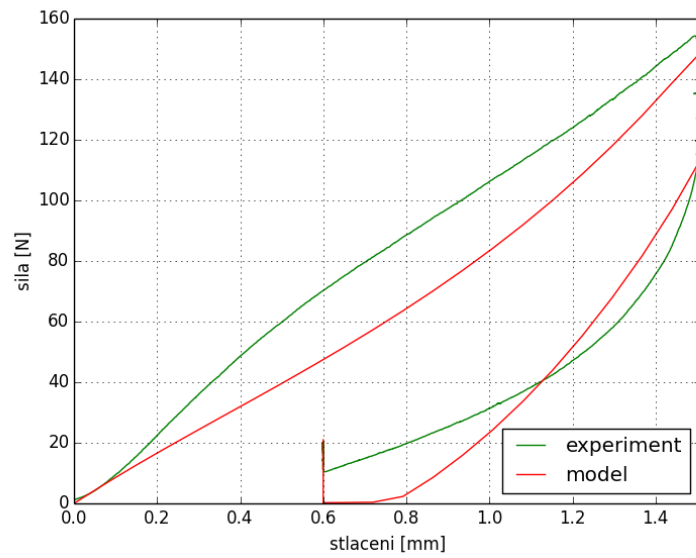
Obrázek 7.5: Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak



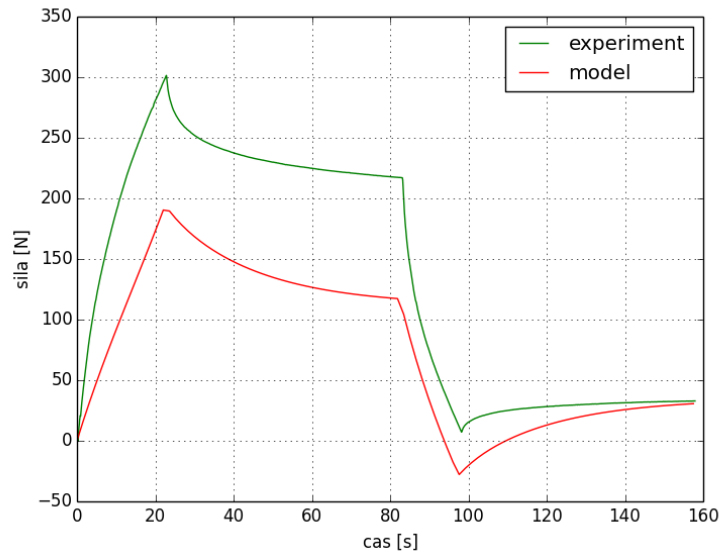
Obrázek 7.6: Porovnání tahového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak



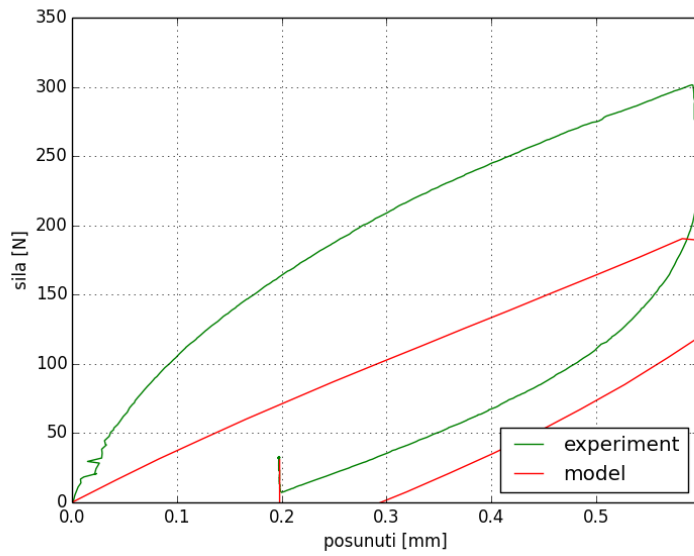
Obrázek 7.7: Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak



Obrázek 7.8: Porovnání tlakového experimentu a modelu s parametry identifikovanými na tah a tlak



Obrázek 7.9: Porovnání smykového experimentu a modelu



Obrázek 7.10: Porovnání smykového experimentu a modelu

8 Závěr

V této práci byla provedena identifikace materiálových parametrů korkového kompozitu na základě porovnávání výsledků z konečnoprvkového modelu a experimentu. Pomocí trhacího stroje byly provedeny zkoušky na jednoosý tah, tlak a prostý smyk. Limitující byla tloušťka zkoumaného materiálu (2 mm), která komplikovala provedení tlakového experimentu. Tento problém byl vyřešen splením 3 vzorků dohromady. Jako materiálový model byla vybrána kombinace Mooney-Rivlinova zobecněného modelu s viskoelastickým modelem definovaným pomocí Pronyho řady. Vzhledem k vybranému modelu bylo identifikováno 12 materiálových parametrů.

Identifikace materiálových parametrů byla provedena pomocí programu Optislang. Bylo využito evolučního a gradientního algoritmu, kdy evoluční algoritmus byl používán jako startovací a gradientní algoritmus byl použit na zpřesnění výsledku. V případě použití samotného gradientního algoritmu (bez vhodných startovacích podmínek) optimalizace nekonvergovala. Identifikace materiálových parametrů byla provedena na tah, tlak a poté na kombinaci tahu a tlaku.

S velmi dobrou shodou byly identifikovány parametry pro samotný tah, tlak i jejich kombinaci. Identifikované parametry však oproti původnímu předpokladu, vycházejícímu z chování pryže, uspokojivě nepopisují chování materiálu ve smyku. Tento problém je nejspíše způsoben stlačitelností korku.

Vzhledem ke špatné shodě ve smyku by tato práce mohla být dále rozšířena o identifikaci na smyk a kombinaci všech tří variant (tah, tlak a smyk).

Literatura

- [1] Acm87 material description and properties. <http://www.corkhouse.co.il/WEB/8888/NSF/Web/8030/ACM-87.pdf>.
- [2] H. F. Brinson. *Polymer engineering science and viscoelasticity an introduction*. Springer, New York, 2008.
- [3] Roger Brown. *Physical testing of rubber*. Springer, New York, 2006.
- [4] B. C. Duncan, A. S. Maxwell, L. E. Crocker, and R. Hunt. Verification of hyperelastic test methods. Technical report, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK, TW11 0LW, 1991.
- [5] Martin Fusek and Radim Halama. Metoda konečných prvků a metoda hraničních prvků. http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecnych_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf, 2011.
- [6] Luís Gil. Cork composites: A review. *Materials*, 2009.
- [7] Jan Heczko, Radek Kottner, and Tomáš Kroupa. Identification of parameters of a nonlinear material model considering the effects of viscoelasticity and damage. *CMC-Computers Materials and Continua*, 1(1):257–273, 2013.
- [8] Radek Kottner, Robert Zemčík, and Josef Vacík. Improvement of damping properties of carbon fibre reinforced laminated plastics using damping layers. *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, 47(2), mar 2013.
- [9] Ctirad Novotný. Viskoelasticita. <http://www.matmodel.cz/content/files/studijni-podklady/Viskoelasticita.pdf>. [Online; přístupováno 25.5.2014].

-
- [10] Helena Pereira. *Cork biology, production and uses*. Elsevier, Amsterdam London, 2007.
- [11] R. S. Rivlin. Large elastic deformations of isotropic materials. vi. further results in the theory of torsion, shear and flexure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 242:173–195, 1949.
- [12] J.C. Simo. On a fully three-dimensional finite-strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 60(2):153 – 173, 1987.
- [13] Josef Vacík. *Integrace pasivních tlumících prvků do kompozitních struktur*. PhD thesis, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [14] Martin Vašina. Úvod do předmětu environmentální fyzika. http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf. [Online; přístupováno 25.5.2014].
- [15] V.Švorčík. Polymery. <http://www.vscht.cz/ipl/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>. [Online; přístupováno 25.5.2014].
- [16] Kerstin Weinberg. Constitutive equations. <http://mechanik.tu-berlin.de/weinberg/Lehre/fem2/Chapter4.pdf>. [Online; přístupováno 25.5.2014].