

Západočeská univerzita
Fakulta aplikovaných věd
Katedra mechaniky

Bakalářská práce

Identifikace materiálových parametrů

LLDPE fólie

Plzeň 2020

Karolína Kučerová

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta aplikovaných věd
Katedra mechaniky
Akademický rok: **2019/2020**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karolína KUČEROVÁ**
Studijní program: B3947 / Počítačové modelování v technice
Studijní obor: 3902R051 / Výpočty a design
Název tématu: Identifikace materiálových parametrů LLDPE fólie

Zásady pro vypracování:

1. Provést rešerši materiálových modelů používaných pro popsání mechanických vlastností LLDPE (lineární nízkohustotní polyetylén) nebo jiných podobných fólií.
2. Experimentálně vyšetřit mechanické vlastnosti LLDPE fólie.
3. Vybrat vhodný materiálový model pro popsání vyšetřených vlastností s důrazem na možnost modelovat rázové (pádové) zkoušky.
4. Identifikovat parametry vybraného modelu.

Rozsah práce: **20 - 40 stran A4 včetně příloh**

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **Vable, M.: Intermediate Mechanics of Materials. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2008.**
2. **Kaňáková, S.: Identifikace materiálových parametrů pěny používané v chráničích motocyklistů. Bakalářská práce, ZČU, 2017.**
3. **Kaňáková, S.: Nadstandardní zkoušky chráničů pro motocyklisty. Diplomová práce, ZČU, 2019.**
4. **Kaňáková, S., Kottner, R.: Identification of material properties of foam used in motorcyclist protective equipment based on obtained experimental data and optimization algorithm. *Applied and Computational Mechanics* 12 (2018) 139–146.**

Vedoucí Bakalářské práce: **Ing. Radek Kottner, Ph.D.**
Katedra mechaniky

Datum zadání bakalářské práce:

Datum odevzdání bakalářské práce:

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je identifikovat materiálové parametry lineární nízkohustotní polyethylenové (LLDPE) fólie. Nejprve byly provedeny tahové a pádové zkoušky a na základě jejich vyhodnocení byl vybrán vhodný materiálový model, konkrétně model izotropně elasticko-plastický. Následně byly vytvořeny modely těchto dvou zkoušek, pomocí kterých byly provedeny konečnoprvkové simulace v programu Abaqus. Poté byly počáteční parametry zoptimalizovány na modelu tahové zkoušky. Dále byly tyto již optimalizované parametry zpřesněny optimalizací zkoušky pádové. Obě dvě tyto optimalizace proběhly v programu ISight za pomoci minimalizace cílové funkce, která představuje numerický součet kvadrátů rozdílů funkčních hodnot simulace a experimentu. Výsledkem této bakalářské práce jsou hodnoty pro materiálové parametry LLDPE fólie, které mohou být dále využity při simulacích nového bezpečnostního systému Nanobag.

Klíčová slova

LLDPE fólie, Nanobag, optimalizace, materiálový model, MKP, tahová zkouška, pádová zkouška, Abaqus, ISight

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to identify the material parameters of linear low density polyethylene (LLDPE) film. First, tensile and drop tests were performed and based on their evaluation, a suitable material model was selected, namely the isotropically elastic-plastic model. Subsequently, models of these two tests were created, with help of these tests were performed finite elements method (FEM) while using Abaqus program. The parameters of both models were gradually optimized by the ISight program by minimizing the target function, which represents the numerical sum of the squares of difference of the unctional values of the simulation and the experiment. Then, the initial parameters were optimized on the tensile test model. Furthermore, these already optimized parameters were refined by optimizing the drop test. The results of this bachelor's thesis are material parameters of the LLDPE film. These parameters can be further used in simulations of the new Nanobag security system.

Keywords

LLDPE foil, Nanobag, optimization, material model, FEM, tensile test, drop test, Abaqus, ISight

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, výhradně s použitím uvedené literatury.

V Klatovech dne 1. 4. 2020

Karolína Kučerová

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Radku Kottnerovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za vedení, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval.

Seznam obrazových příloh

1	Naznačení směrů fólie	4
2	Vzorek fólie s kartonovým papírem	4
3	Schéma pro znázornění výpočtu posuvů	5
4	Závislosti síly na posuvu	5
5	Experimentální provedení pádové zkoušky	6
6	Závislosti posuvu na čase	7
7	Posuv a zrychlení v závislosti na čase, pádová výška 1,5 m	8
8	Posuv a zrychlení v závislosti na čase, pádová výška 1 m	8
9	Poměr plastické a elastické deformace ve smluvním diagramu	9
10	Vzdálenosti vysvětlující poměry v Poissonovu číslu	10
11	Rozdílný poměr plastické a elastické deformace	11
12	Okrajové podmínky	12
13	Symetricky zjednodušený model	13
14	Sít' modelu pádové zkoušky	13
15	Ukázka posuvů sítě fólie ve směru osy z [m]	14
16	Schéma optimalizace	14
17	Experiment s aproximací	16
18	Porovnání křivek závislostí síly na posuvu	19
19	Porovnání křivek pro data z experimentu pro směr T a pro data ze simulace s materiálovými parametry TAH pro směr M	20
20	Závislosti z modelu pádové zkoušky při použití parametrů TAH	21
21	Porovnání křivek závislostí posuvu na čase	23
22	Porovnání křivek závislostí zrychlení na čase	23
23	Porovnání křivek závislostí posuvu na čase	24

Seznam tabulek

1	Počáteční parametry materiálového modelu	15
2	Materiálové parametry TAH	18
3	Materiálové parametry PAD	22

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	jednotka	název
a	ms^{-2}	zrychlení razníku při pádové zkoušce
E	Pa	Youngův modul pružnosti v tahu
F	N	síla působící na vzorek fólie při tahové zkoušce
F_{EXP}	Pa	síla z experimentu
F_{MKP}	Pa	síla ze simulace
G	Pa	modul pružnosti ve smyku
HDPE	-	vysokohustotní polyethylenová fólie
l	m	délka vzorku fólie před působením zatížení
l_x	m	délka před působením zatížení
l_y	m	šířka před působením zatížení
l_0	m	délka vzorku fólie po působení zatížení
LDPE	-	nízkohustotní polyethylenová fólie
LLDPE	-	lineární nízkohustotní polyethylenová fólie
parametry TAH	-	optimalizované parametry pomocí modelu tahové zkoušky
parametry PAD	-	optimalizované parametry pomocí modelu p8dové zkoušky
Re	Pa	mez kluzu
t	s	čas
U	V	napětí
w	m	posuv razníku při pádové zkoušce
Δl	m	prodloužení vzorku natahované fólie
ΔL_x	m	prodloužení vzorku natahované fólie ve směru x
ΔL_y	m	zkrácení vzorku natahované fólie ve směru y
ε	-	poměrné prodloužení
ε_{el}	-	elastická část poměrného prodloužení
ε_{pl}	-	plastická část poměrného prodloužení
ε_x	-	poměrná deformace v podélném směru (ve směru namáhání)
ε_y	-	poměrná deformace v příčném směru (kolmém na směr namáhání)
μ	-	Poissonovo číslo
σ	Pa	napětí

Obsah

1	Úvod	1
2	Rešerše	2
2.1	Charakteristika LLDPE fólie	2
2.2	Modely pro polyethylenové fólie	2
3	Experimenty	4
3.1	Tahová zkouška	4
3.1.1	Vyhodnocení tahové zkoušky	4
3.2	Pádová zkouška	5
3.2.1	Vyhodnocení pádové zkoušky	7
4	Materiálový model	9
5	Identifikace	12
5.1	Modely	12
5.1.1	Model tahové zkoušky	12
5.1.2	Model pádové zkoušky	12
5.2	Identifikace materiálových parametrů	14
5.2.1	Optimalizace materiálových parametrů pomocí tahové zkoušky . . .	15
5.2.2	Optimalizace materiálových parametrů pomocí pádové zkoušky . . .	16
5.3	Výsledky	18
6	Závěr	25
	Seznam literatury	26

1 Úvod

Lineární nízkohustotní polyetylenové fólie (LLDPE) jsou dnes již běžnou součástí konzumního života. Používají se například jako obalové materiály, elastické sáčky, odpadové pytle či jako obyčejné sáčky pro balení různých výrobků i při vyšší teplotě [4]. Mají vysoký lesk, jsou odolné jak vůči namáhání na tah, tak na případné propíchnutí a jsou velmi plastické.

Díky uvedeným vlastnostem by mohla být LLDPE fólie ideálním kandidátem pro použití v bezpečnostním systému NanoBag. Tento systém by mohl v budoucnu nahradit klasické airbagy používané v automobilech. Princip Nanobagu spočívá v tom, že při nárazu automobilu do překážky se ze stropu vysunou svisle dolů tyčky s omotanou fólií, do které uživatel automobilu při setrvačném pohybu zanoří hlavu. Výhoda oproti klasickému airbagu je ta, že systém Nanobag se spouští ze stropu a nikoli z vertikální stěny. To by našlo své uplatnění při pravděpodobném budoucím využívání autonomních vozidel, kdy pasažéři mohou sedět čelem k sobě či v jiných pozicích, kdy nebude možné využít klasický airbag.

Cílem této bakalářské práce je nalézt materiálové parametry za pomoci tahových a pádových zkoušek a jejich následné simulace. Získané materiálové parametry by mohly být využity v dalších výzkumech, při modelování crash testů a následného stanovení, zda je tento materiál pro bezpečnostní systém Nanobag vhodný.

2 Rešerše

2.1 Charakteristika LLDPE fólie

Dle [6] je zřejmé, že nízkohustotní polyetylen (LDPE) a lineární nízkohustotní polyetylen (LLDPE) mají při rázových zkouškách, za stejných podmínek, různé deformační chování. Tyto rozdíly se projevují především v grafu závislosti síly na poměrném prodloužení, kdy křivka před dosažením maximální síly měla pro nízkohustotní polyetylen spíše lineární charakter, zatímco pro lineární nízkohustotní polyetylen ne. Po překonání této maximální hodnoty byla pro nízkohustotní polyetylen naměřena další extrémní hodnota, kdežto pro druhý zmíněný materiál nikoli.

Z [6] plyne, že při stejné působící síle ve směru M a poté ve směru T jsou napětí v jednotlivých směrech různá, přičemž směr M označuje směr tažení fólie při výrobě, zatímco směr T je kolmý na směr M. Z toho vyplývá, že ve směru M jsou jiné materiálové vlastnosti než ve směru T.

Pokud by se měla porovnat pevnost v tahu u LLDPE a LDPE fólií testovaných v M a T směru, větší pevnosti v tahu v těchto dvou směrech dosahují LLDPE fólie. Také tažnost, neboli procentuální prodloužení v tahu, je výrazně lepší v případě LLDPE fólie. Pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) byla také zjištěna u LDPE fólie vyšší houževnatost ve směru T než ve směru M, kdežto pro LLDPE fólii byla zjištěna téměř ekvivalentní houževnatost jako pro směr T, tak pro směr M. [6].

2.2 Modely pro polyethylenové fólie

Typ zvoleného materiálového modelu závisí na mnoha molekulárních parametrech jako jsou například molekulární struktura, molekulární hmotnost, krátké či dlouhé větvení. Všechny tyto vlastnosti se odrážejí na chování daného materiálu a tím pádem i na typu zvoleného materiálového modelu [6].

Vysokohustotní polyethylenovou fólii (HDPE), nízkohustotní polyethylenovou fólii (LDPE) a lineární nízkohustotní polyethylenovou fólii (LLDPE) lze namodelovat pomocí viskoelastického a viskoplastického konstitutivního modelu pro polymerní materiály [4] [5].

HDPE fólie může být modelována pomocí pokročilého viskoelastického-viskoplastického modelu TN (Three Network), jehož parametry jsou stanoveny pomocí vyhodnocení jednoosých tahových a tlakových zkoušek za různých rychlostí [7].

Ve studii [3] byl pro modelaci LDPE fólie použit ortotropní, elasto-viskoplastický model, kde dále předpokládali, že materiál má též ortotropní vlastnosti jak pro plastickou, tak pro elastickou část modelu. Elastické chování ortotropního materiálu je nutné popsat pomocí 9 nezávislých konstant, konkrétně třemi Youngovými moduly pružnosti, třemi Poissonovými čísly a třemi smykovými moduly. Matice poddajnosti, která sdružuje materiálové parametry, je uvedena v (1).

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

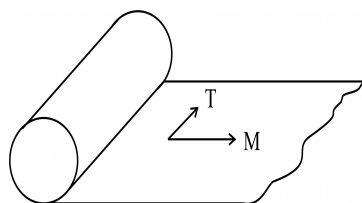
Ve studii [2], zabývající se LLDPE fóliemi, se Poissonovo číslo pohybuje mezi hodnotami 0,3 a 0,4.

Dále lze říci, že plastické chování LDPE fólie lze charakterizovat pomocí počáteční meze kluzu a plastickým napětím, které je pro tuto mez nulové. Po této mezi křivku závislosti napětí na plastické deformaci charakterizuje vždy příslušné napětí k příslušné plastické deformaci. Tuto křivku lze experimentálně určit pomocí jednoosé zkoušky tahem. Obecně dále platí, že jednoosé napětí potřebné k vytvoření plastické deformace závisí také na rychlosti deformace, což ukazuje na fakt, že materiál je visko-plastický. Toto visko-plastické chování lze popsat pomocí Johnson-Cookova zákona o viskozitě. Tento materiálový model fungoval dobře při monotónním zatížení, při cyklickém zatěžování bylo zjištěno, že nepokryje veškeré materiálové vlastnosti LDPE fólie, kdy ze závislosti napětí na poměrném prodloužení bylo zřejmé, že se materiál chová spíše anizotropně [3].

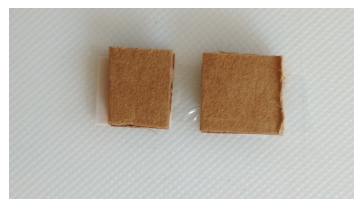
3 Experimenty

3.1 Tahová zkouška

Z folie byly vyříznuty vzorky ve směru M (obr. 1), na koncích vzorků byl nalepen z obou stran silný kartonový papír, aby se co nejvíce zamezilo deformaci vzorků natahováním v čelistech zkušebního stroje (obr. 2). Vzorky byly upnuty do čelistí testovacího zařízení 574LE2 TestResources na vzdálenost 5 mm, natahovaná část vzorků měla rozměry (10 x 5 x 0,012) mm. Testovací zařízení snímalo hodnoty s frekvencí 200 Hz. Vzorky byly natahovány rychlostmi 0,2 mm/s, 20 mm/s a 100 mm/s. Měřeny byly síly při natahování příslušného vzorku do vzdálenosti 0,0526 m, z čehož byla poté vyhodnocena závislost síly na posuvu. To samé bylo zopakováno pro stejně velké vzorky i ve směru T (obr. 1).



Obr. 1: Naznačení směrů fólie



Obr. 2: Vzorek fólie s kartonovým papírem

Protože nebylo změřené příčné zúžení, nebylo možné stanovit změnu průřezu v daných časových okamžicích, a tudíž ani skutečné napětí ve vzorku.

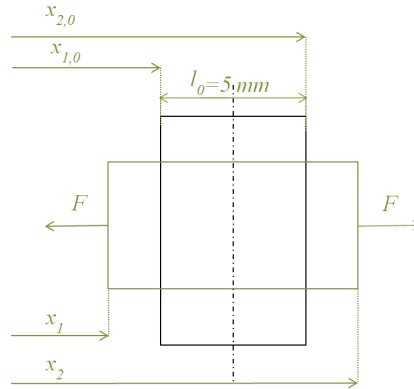
Pro každou rychlost a směr bylo změřeno 6 vzorků, které byly následně vyhodnocovány.

3.1.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

Byly změřeny síly potřebné pro natažení vzorku do určité předepsané vzdálenosti. Prodloužení bylo spočteno ze záznamu poloh čelistí dle vztahu (2).

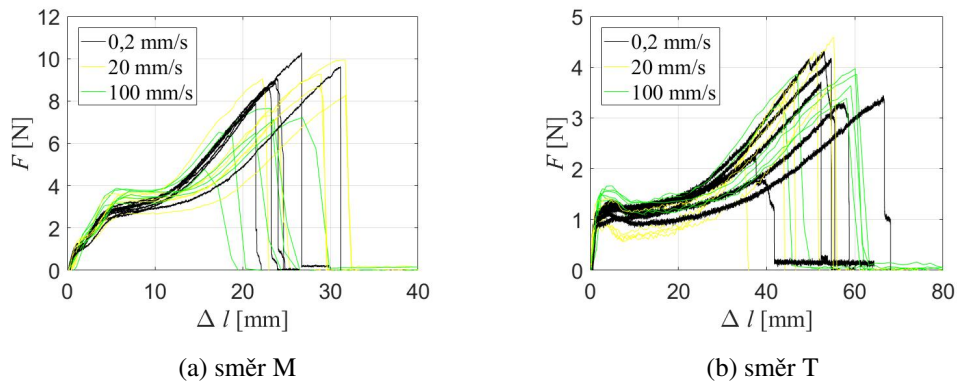
$$\Delta l = (x_2 - x_1) - (x_{2,0} - x_{1,0}) \quad (2)$$

Na obr. 3 jsou vysvětleny veličiny z rovnice (2).



Obr. 3: Schéma pro znázornění výpočtu posuvů

Změřená závislost síly na posuvu je zobrazena na obr. 4.

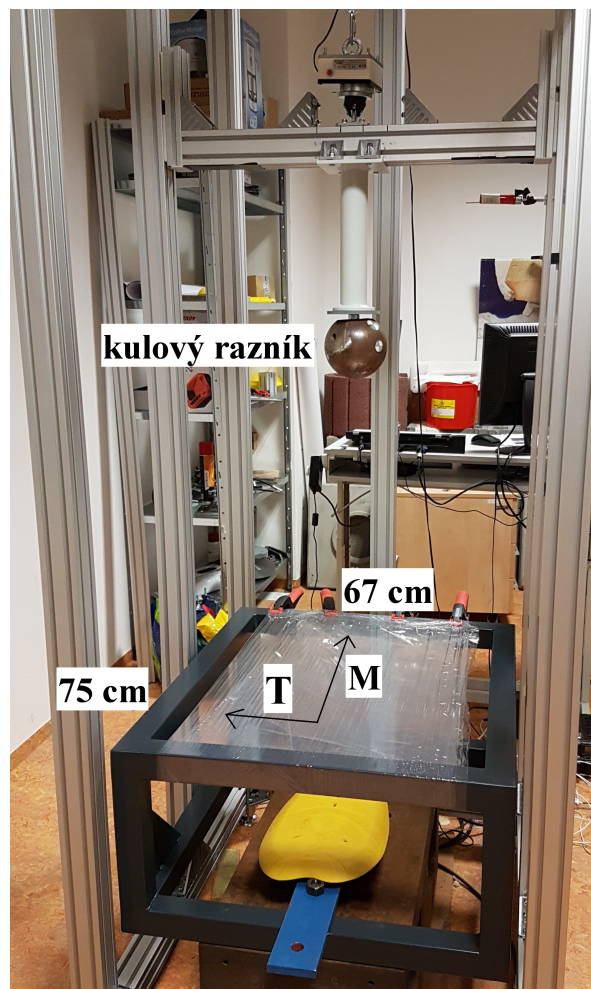


Obr. 4: Závislosti síly na posuvu

Z grafů na obrázku 4 lze vyhodnotit, že ani v jednom směru nezáleželo na rychlosti, kterou byl vzorek natahován. Dále je na obr. 4 zřejmé, že materiál, ze kterého je LLDPE fólie, není izotropní. I přes tento fakt bude materiál i nadále považován za izotropní.

3.2 Pádová zkouška

Kvůli co nejpřesnějšímu napodobení bezpečnostního systému Nanobag byl vyroben obdélníkový rám (obr. 5) o vnějších rozměrech 75 cm x 67 cm, šířka rámu je 5,75 cm.



Obr. 5: Experimentální provedení pádové zkoušky

Na tento rám bylo navinuto 8 vrstev LLDPE folie, na kterou padal kulový razník o hmotnosti 10,72 kg a průměru 14,9 cm nejprve z výšky 1 m a poté z výšky 1,5 m. To samé bylo zopakováno též pro 9 a 10 vrstev LLDPE folie. Při provedení všech těchto pokusů bylo měřeno napětí U s frekvencí 26 kHz, které bylo přes převodní vztah (3) přepočteno na posuv folie při dopadu razníku.

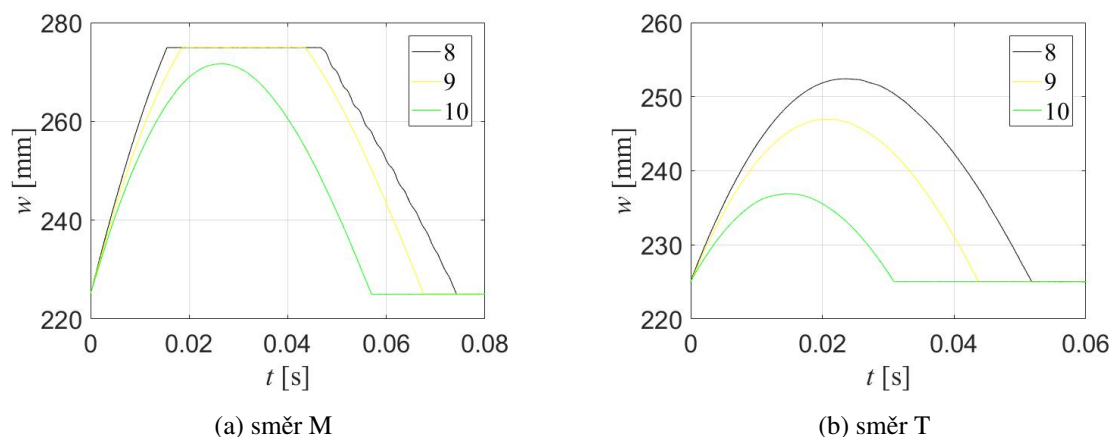
$$w = (-pU) + w_p, \quad (3)$$

kde $p = 10 \frac{mm}{V}$ a $w_p = 275$ mm označuje maximální měřitelnou hodnotu posuvu folie měřeného pomocí laseru Micro-Epsilon optoNCTD 2300-50 a byla zvolena s ohledem na následnou využitelnost v bezpečnostním systému Nanobag. Zrychlení bylo změřeno akcelerometrem KISTLER 8742A5, jenž byl umístěn téměř uprostřed na horizontálním příčnicku, se kterým

je spojen kulový razník.

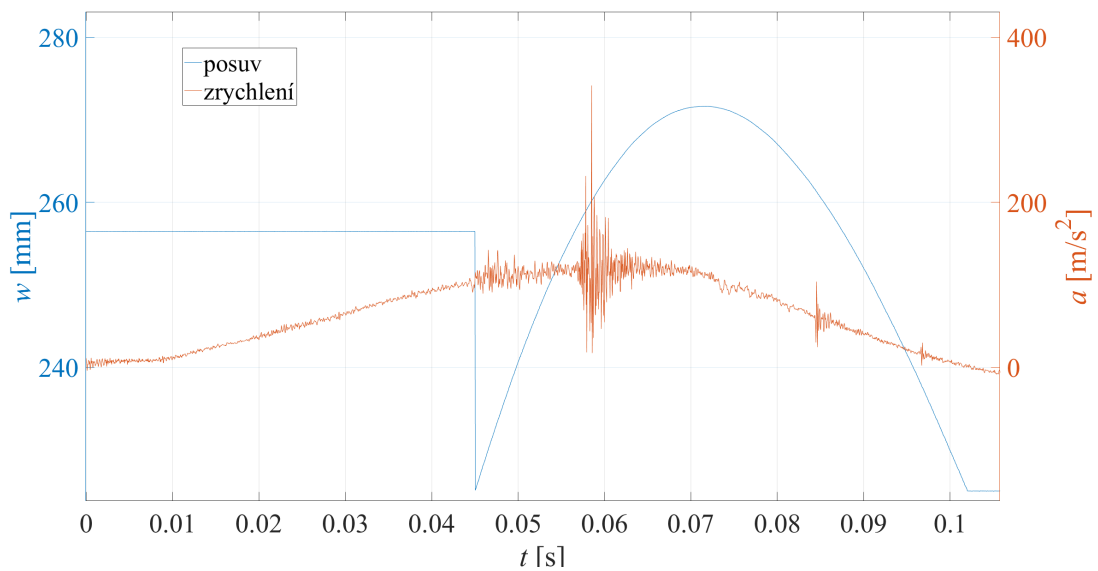
3.2.1 Vyhodnocení pádové zkoušky

Na základě přepočtu dat dle (3) z pádové zkoušky mohly být vyhodnoceny závislosti maximálního posuvu fólie na čase (Obr. 6). Laser snímal pouze v rozmezí 50 mm, proto v obr. 6, pro směr M, jsou pro 8 a 9 návinů LLDPE fólie konstantní hodnoty, maximální hodnoty v čase zde nejsou zachyceny. Na obr. 6 lze dále vidět, že se stoupajícím počtem vrstev fólie a s klesající pádovou výškou klesají hodnoty posuvů.



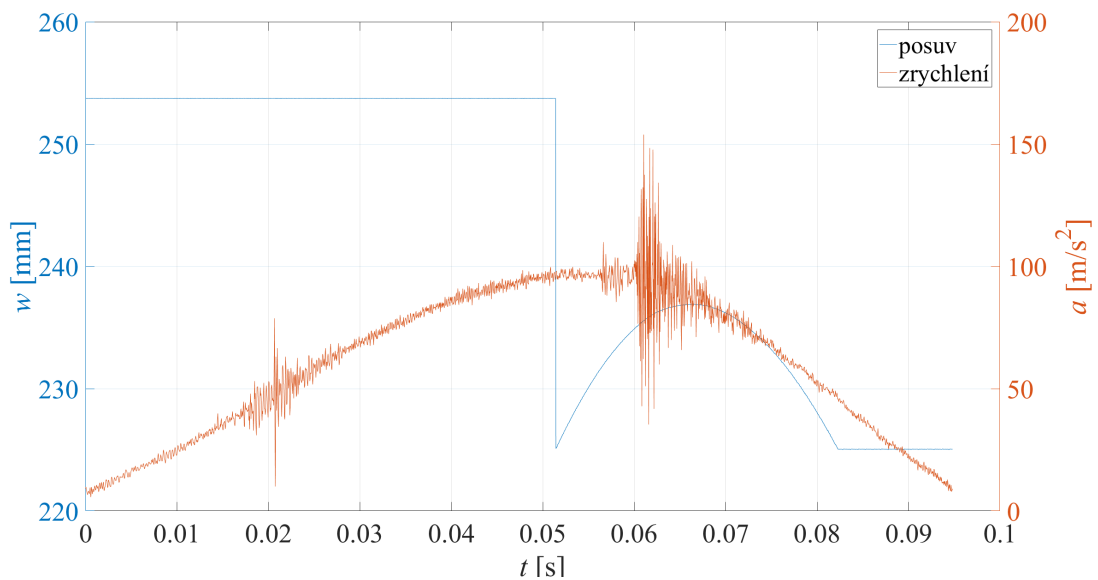
Obr. 6: Závislosti posuvu na čase

Pro lepší pochopení posuvu na čase je zde pro směr M a 10 návinů LLDPE fólie zobrazen graf, ve kterém je zobrazeno zrychlení i posuvy v závislosti na čase (obr. 7). Čas $t = 0$ je časový okamžik, kdy se razník dotknul fólie, tedy tehdy, kdy laser pro měření posuvů ještě nic nezaznamenal, jelikož snímal jenom posledních 50 mm, aby zaznamenal maximální hodnotu posuvu. Mimo tento rozsah ukazuje laser zcela nesmyslnou hodnotu. Na témže grafu si lze všimnout, že maximální hodnota posuvu je vůči maximální hodnotě zrychlení zhruba o 0,01 s posunutá. To mohlo být způsobeno vůlí v uložení razníku a jeho následném kývání při pádu na fólii.



Obr. 7: Posuv a zrychlení v závislosti na čase, pádová výška 1,5 m

Na obr. 8 lze vidět analogickou závislost jako na obr. 7. Zde je pádová výška razníku pouze 1 m, počet vrstev fólie zůstává stejný, jako u předchozí závislosti, tedy 10 návinů. I zde je patrné, že maximální hodnoty obou veličin nejsou dosaženy v tentýž čas. Důvody pro tento posun jsou stejné jako v případě obr. 7.

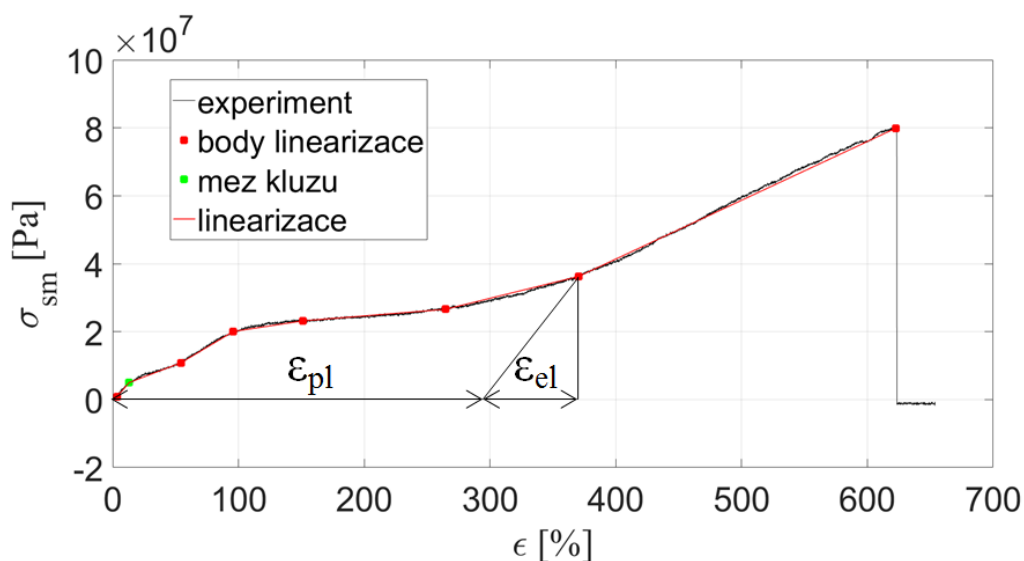


Obr. 8: Posuv a zrychlení v závislosti na čase, pádová výška 1 m

4 Materiálový model

Byl vybrán izotropně elasto-plastický materiálový model, který byl zvolen zejména kvůli výraznému namáhání fólie ve směru M při použití v bezpečnostním systému Nanobag a také s ohledem na rozsah této práce.

Při zatěžování vzorku je závislost smluvního napětí σ_{sm} na poměrném prodloužení ϵ lineární až do meze kluzu Re . Po jejím překročení nastávají v materiálu nejenom vratné elastické deformace ϵ_{el} , ale i nevratné deformace plastické ϵ_{pl} (Obr. 9), které materiál nenávratně změní.



Obr. 9: Poměr plastické a elastické deformace ve smluvním diagramu

Poměrné prodloužení je definováno vztahem (4), kde l_0 je délka vzorku před působením zatížení.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Dále je prodloužení definováno pomocí vztahu (5) kde Δl představuje rozdíl délky vzorku po působení zatížení l a původní délky vzorku l_0 .

$$\Delta l = l - l_0 \quad (5)$$

Poměrné prodloužení ϵ je složeno ze dvou dílčích částí a to z části plastické ϵ_{pl} a z části elastické ϵ_{el} . Jejich vzájemný vztah je vyjádřen rovnicí (6).

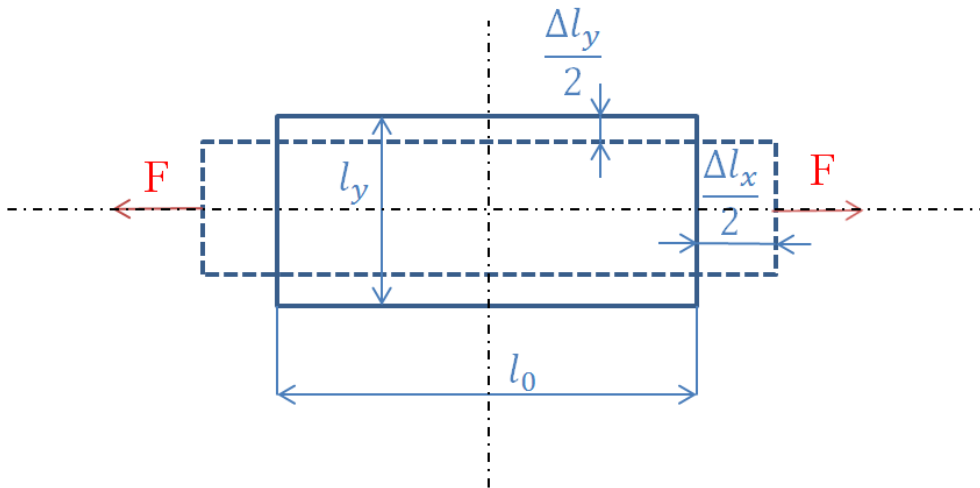
$$\epsilon = \epsilon_{pl} + \epsilon_{el} \quad (6)$$

Plastické deformace vznikají tehdy, je-li překročena mez kluzu Re . Pokud je překročena, tak při odlehčení není křivka stejná, jako při zatěžování, nýbrž je rovnoběžná s lineární částí smluvního digramu do meze kluzu (obr. 9). Tím se rozdělí deformace na elastické a plastické. Další důležitý parametr popisující chování materiálu je Youngův modul pružnosti v tahu E . Ten je určen směrnici přímky (7) do meze kluzu ve smluvním diagramu (obr. 9).

$$E = \tan(k) \quad (7)$$

Neméně důležité je i Poissonovo číslo μ , které vyjadřuje poměr relativního příčného zúžení ku relativnímu podélnému prodloužení (8), symboly jsou vysvětleny na obr. 10. Hodnoty tohoto parametru se pohybují mezi čísly 0 a 1.

$$\mu = \left| \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \right| = \left| \frac{\frac{\Delta l_y}{l_y}}{\frac{\Delta l_x}{l_x}} \right| \quad (8)$$



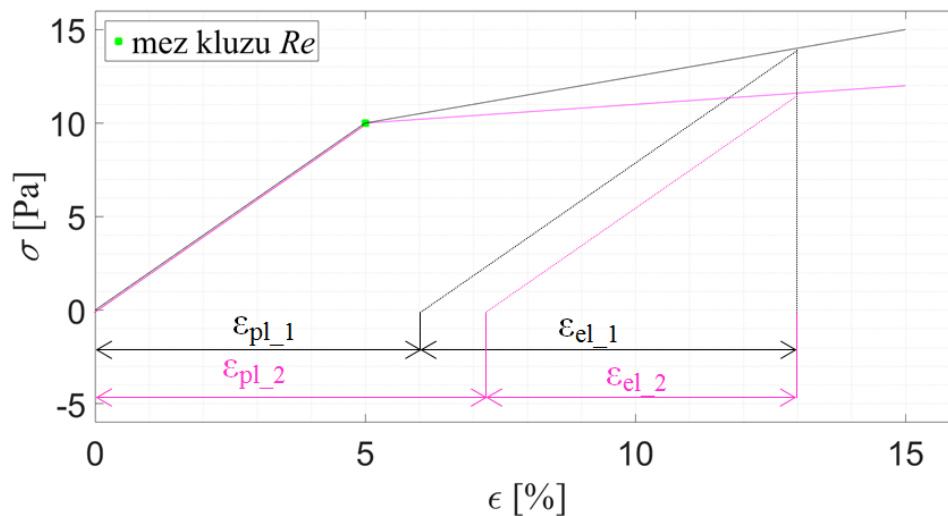
Obr. 10: Vzdálenosti vysvětlující poměry v Poissonovu číslu

Na základně zvolení izotropního modelu bude chování LLDPE fólie do meze kluzu určeno Poissonovým číslem μ a Youngovo modulem pružnosti E .

Dále bylo zapotřebí pomoci vhodně zvoleného modelu zachytit reálné chování fólie po překročení meze kluzu Re . Jak už bylo řečeno na začátku kapitoly 4, po překročení této meze nastávají v materiálu vyjma vratných elastických deformací ε_{el} i nevratné deformace plastické ε_{pl} . Jedna z možností, jak definovat chování materiálu po překročení meze kluzu Re , je nalézt příslušná napětí σ k příslušným poměrným prodloužením ε , která budou co nejpřesněji aproximovat křivku v tahovém diagramu.

Vzhledem k velkým deformacím a k výrazné změně průřezu LLDPE fólie se smluvní napětí σ_{sm} velmi liší od skutečného napětí σ . Na základě provedených experimentů nelze přesně určit závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení.

Chování materiálu po překročení meze kluzu Re lze popsat například podle poměru jednotlivých deformací. Na obr. 11 lze vidět, že čím je směrnice přímky po překročení meze kluzu Re větší, tím je poměr $\varepsilon_{el}:\varepsilon_{pl}$ větší.



Obr. 11: Rozdílný poměr plastické a elastické deformace

Na základě toho lze lépe odhadnout, kde bude zapotřebí zvolit jemnější aproximace a kde naopak postačí aproximace hrubší.

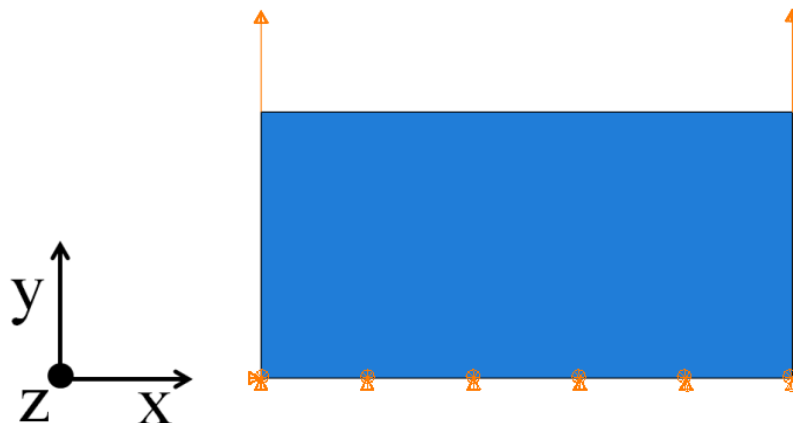
5 Identifikace

5.1 Modely

Pro modelování obou zkoušek, jak tahové, tak pádové, byl zvolen konečno-prvkový systém Abaqus. LLDPE fólie byla materiálově popsána pomocí izotropně elasto-plastického modelu, z důvodů které jsou uvedeny v kapitole 4.

5.1.1 Model tahové zkoušky

Byl vymodelován skořepinový model o rozměrech 10 mm x 5 mm x 0,012 mm, tedy pouze ta část fólie, která byla natahována. Část fólie, která byla uchycena v čelistech modelována nebyla. Model byl sestaven tak, že na jedné straně byly zakázány posuvy ve všech směrech, zatímco na straně druhé byl v čase předepsán lineární posuv až do vzdálenosti 0,0526 m ve směru y (obr. 12). Vzhledem k povaze tahové zkoušky se síť sestávala pouze z jednoho elementu.



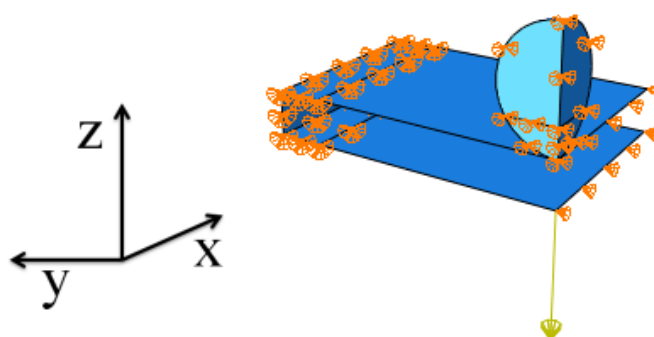
Obr. 12: Okrajové podmínky

5.1.2 Model pádové zkoušky

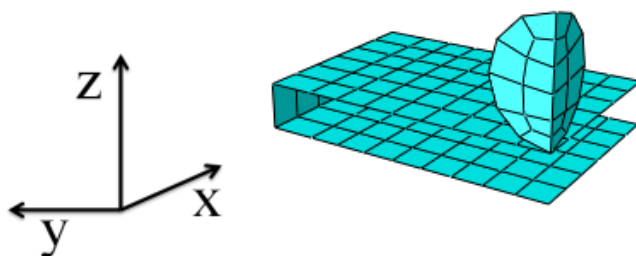
Jelikož pádová zkouška má dvě roviny symetrie, mohla být namodelována pouze 1/4 rámu a kulového razníku (obr. 13). Dále nebyl pro ušetření výpočetního času simulován

samotný pád kulového razníku, nýbrž mu byla přiřazena taková rychlost, kterou by v daném čase měl těsně před dotekem s fólií. V modelu bylo také zohledněno působení gravitačního zrychlení, zatímco vliv odporu prostředí nebyl uvažován. Síť fólie (obr. 14) byla zvolena kvůli zkrácení výpočtového času spíše hrubší, ale zároveň natolik jemná, aby nedocházelo k nereálnému pohybu fólie po nárazu razníku a tím i ke zkreslení výsledků.

Razníku byla předepsána taková hustota, aby při daném objemu odpovídala jeho skutečné hmotnosti. Pro zjednodušení modelu bylo všech 10 vrstev fólie modelováno jako jedna o desetinásobné tloušťce oproti skutečné tloušťce jedné vrstvy fólie.

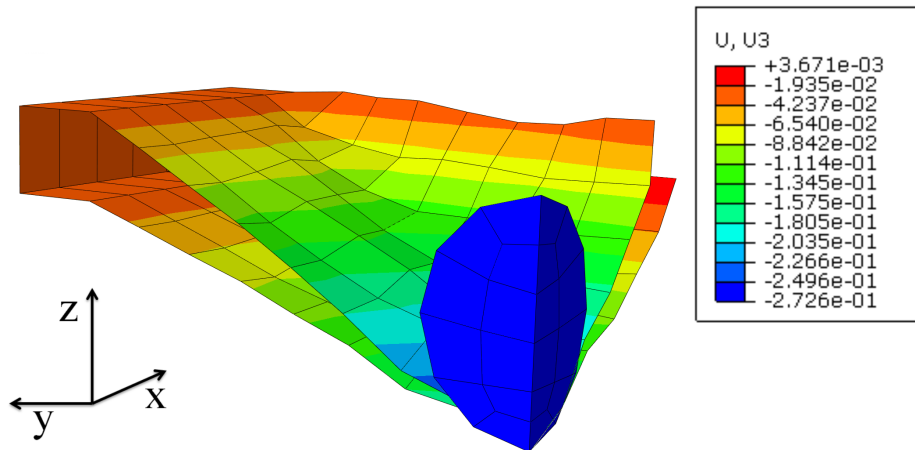


Obr. 13: Symetricky zjednodušený model



Obr. 14: Síť modelu pádové zkoušky

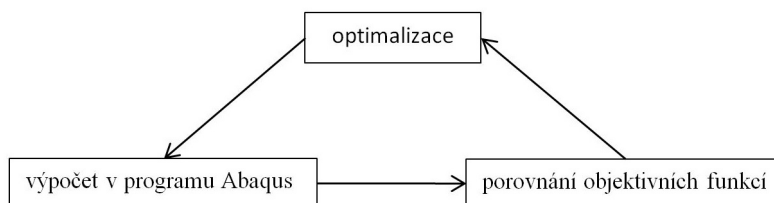
Na obr. 15 lze vidět ukázkou posuvů ve směru osy z sítě fólie při pádu razníku z výšky 1,5 m na 10 navinutých vrstev fólie.



Obr. 15: Ukázka posuvů sítě fólie ve směru osy z [m]

5.2 Identifikace materiálových parametrů

Protože výpočetní čas tahové zkoušky byl zhruba 40x rychlejší než v případě pádové zkoušky, probíhala optimalizace materiálových parametrů ve dvou částech. V části první došlo k optimalizaci materiálových parametrů na základě tahové zkoušky. Získané materiálové parametry byly následně použity jako vstupní parametry pro konečnou optimalizaci pádové zkoušky. Obě dvě optimalizace byly provedeny v optimalizačním programu ISight za pomoci schématu na obr. 16.



Obr. 16: Schéma optimalizace

Optimalizace vždy probíhala následujícím způsobem. Nejprve byl proveden výpočet v programu Abaqus s počátečními materiálovými parametry LLDPE fólie. V případě tahové zkoušky byla získaná tahová křivka závislosti síly na posuvu porovnána s křivkou téže závislosti získanou z měření ve směru M. V případě pádové zkoušky byla porovnávána maximální hodnota posuvu pro 10 návinů fólie.

5.2.1 Optimalizace materiálových parametrů pomocí tahové zkoušky

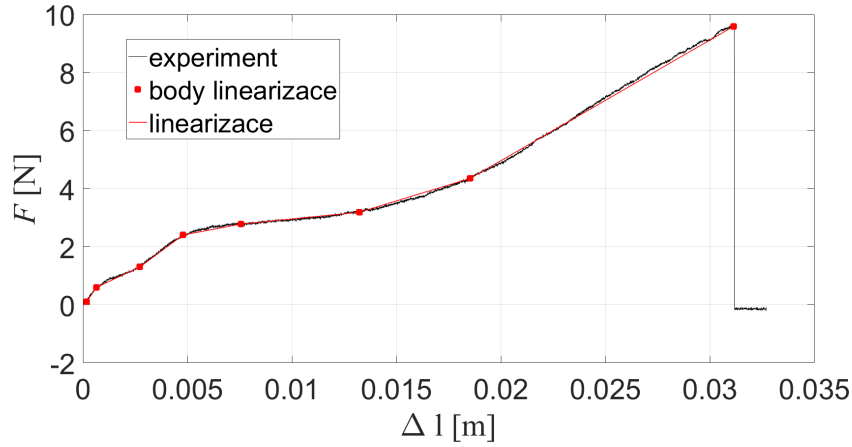
Optimalizace materiálových parametrů v případě tahové zkoušky byla prováděna na základě porovnávání křivek závislostí síly na posuvu, nikoli napětí na poměrném prodloužení. Pro prvotní odhad byly zvoleny materiálové parametry uvedené v tab. 1. Jelikož nebyl dopředu znám ani počet parametrů elasto-plastického modelu, byly tyto parametry zvoleny na základě velmi hrubého odhadu, jak by se materiál mohl chovat. Youngův modul pružnosti byl přibližně vyčíslen jako směrnice počáteční lineární části v obr. 9. Protože se jednalo o graf závislosti smluvního napětí na poměrném prodloužení, musela být optimalizována i tato hodnota. Poissonovo číslo bylo zvoleno 0,36 na základě rešerše v kapitole 4.

Napětí [MPa]	Plastická deformace [-]
30	0.0
25	0.1
40	0.3
41	0.5
66	0.9
190	1.6
420	2.0
1100	2.6
Youngův modul pružnosti [GPa]	40

Tab. 1: Počáteční parametry materiálového modelu

Pro vyšší rychlost optimalizace bylo potřeba proložit křivku experimentu po částech

úsečkami na základě kapitoly 4. Tuto aproximaci zobrazuje obr. 17. Pro získání parametrů byla použit optimalizační algoritmus Hooke-Jeeves.



Obr. 17: Experiment s aproximací

Byla použita objektivní funkce, která vyjadřovala součet kvadrátů rozdílů jednotlivých funkčních hodnot obou závislostí síly na posuvu (9). V průběhu optimalizovace byla výsledná hodnota objektivní funkce (9) minimalizována. Hodnota $F_{\text{MKP}}(\Delta l_i)$ vyjadřuje sílu příslušné funkce z MKP programu Abaqus, zatímco $F_{\text{EXP}}(\Delta l_i)$ představuje velikost síly získanou pomocí experimentu. Hodnoty $F_{\text{EXP}}(\Delta l_i)$ jsou tedy pro danou optimalizaci konstantní, kdežto $F_{\text{MKP}}(\Delta l_i)$ se mění při každé iteraci optimalizace.

$$\min \sum_i (F_{\text{MKP}}(\Delta l_i) - F_{\text{EXP}}(\Delta l_i))^2 \quad (9)$$

5.2.2 Optimalizace materiálových parametrů pomocí pádové zkoušky

V případě pádové zkoušky byly parametry optimalizovány na základě porovnání maximálního posuvu fólie z dat pro směr M a pro 10 návinů fólie.

Nejprve byl použit znovu optimalizační algoritmus Hooke-Jeeves, který se ovšem ukázal jako neefektivní v hledání materiálových parametrů. Proto byl poté použit evoluční optimalizační algoritmus, který se ukázal jako efektivnější volba. Byl optimalizován Youngův modul

pružnosti spolu s napětími příslušné k plastickým deformacím. Plastické deformace dále optimalizovány nebyly.

V případě optimalizace pádové zkoušky byla použita objektivní funkce, která vyjadřovala kvadrát rozdílů maximálních hodnot posuvů (10). V průběhu optimalizace byla výsledná hodnota objektivní funkce (10) minimalizována. Hodnota $w_{\max, \text{MKP}}$ vyjadřuje maximální posuv z MKP programu Abaqus, zatímco $w_{\max, \text{EXP}}$ představuje maximální velikost posuvu z experimentu. Hodnota $w_{\max, \text{EXP}}$ je tedy pro danou optimalizaci konstantní, zatímco $w_{\max, \text{MKP}}$ se mění při každé iteraci optimalizace.

$$\min(w_{\max, \text{MKP}} - w_{\max, \text{EXP}})^2 \quad (10)$$

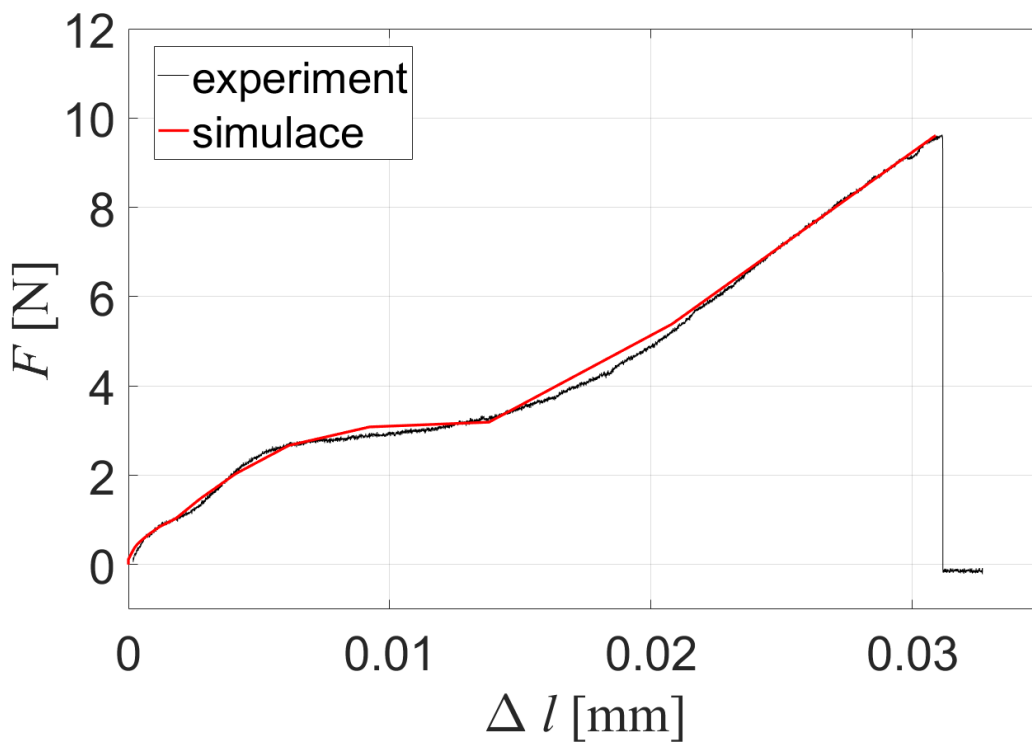
5.3 Výsledky

Získané optimalizované parametry pomocí modelu tahové zkoušky (parametry TAH) jsou uvedeny v tab. 2.

Napětí [MPa]	Plastická deformace [-]
1,90	0,0
7,31	0,053
26,61	0,359
66,50	0,632
233,43	1,496
985,55	1,952
4536,29	2,127
1130,30	2,654
Youngův modul pružnosti [GPa]	1053

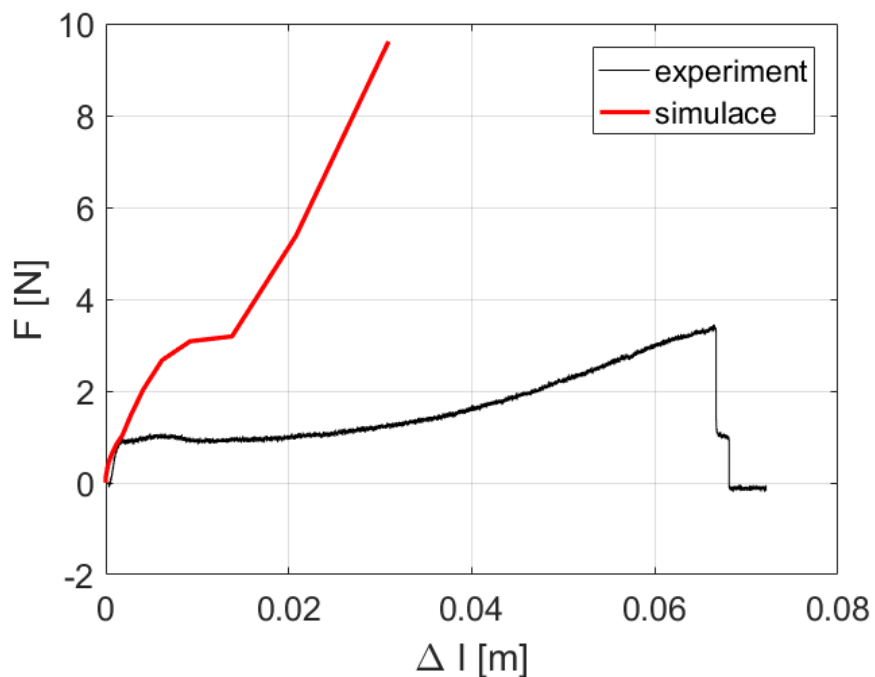
Tab. 2: Materiálové parametry TAH

Na obr. 18 je zobrazena závislost síly na posuvu v porovnání s experimentem za předpokladu, že byly použity materiálové parametry TAH z tab. 2. Křivka simulace velice dobře kopíruje data získané měřením, získané materiálové parametry TAH mohly být použity pro optimalizaci časově náročnějšího modelu, konkrétně modelu pádové zkoušky.



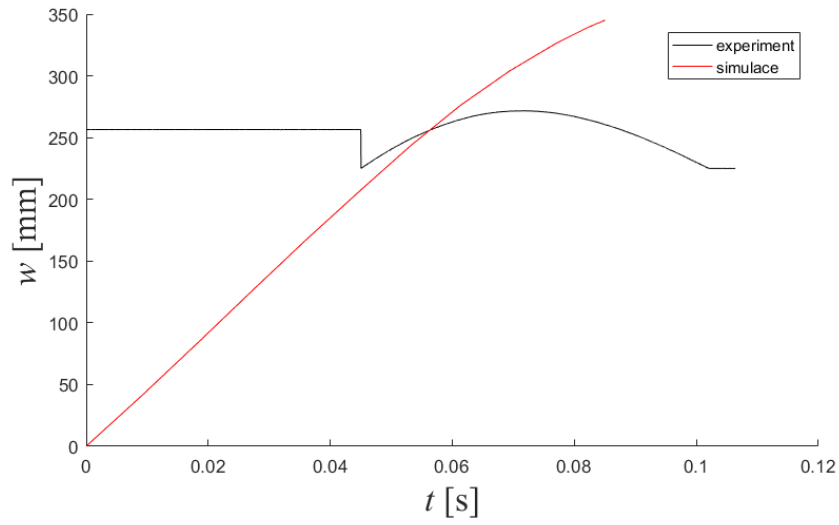
Obr. 18: Porovnání křivek závislostí síly na posuvu

Porovnání křivky závislosti síly na prodloužení, získaná pomocí modelu tahové zkoušky s parametry TAH z tab. 2, a typické křivky získané z tahové zkoušky pro směr T (a nikoli pro směr M, vzhledem k němuž jsou dělána všechna porovnání v rámci identifikace materiálových parametrů TAH), lze vidět na obr. 19. Je zde dobře vidět, že pro směr T by byly zapotřebí jiné materiálové parametry než pro zkoumaný směr M. Z tohoto porovnání také plyne, že zkoumaný materiál LLDPE fólie nemá izotropní vlastnosti.

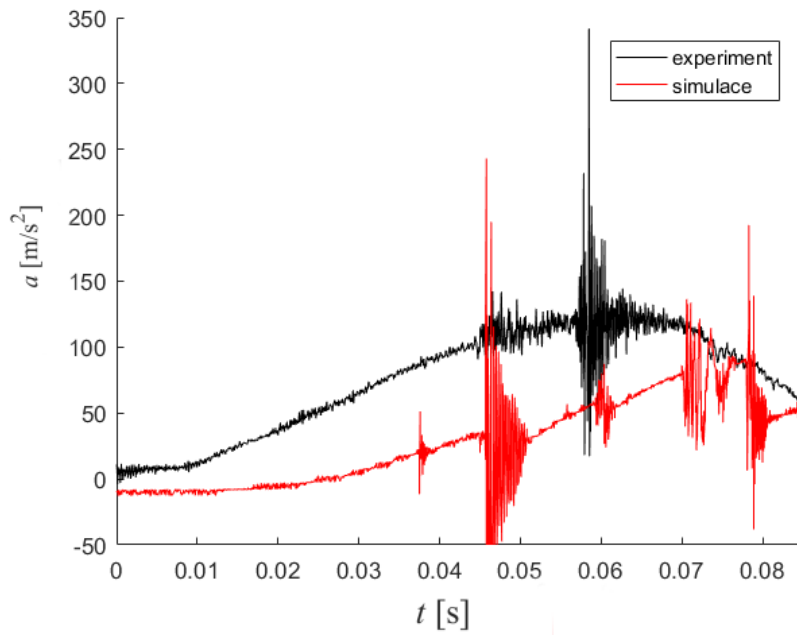


Obr. 19: Porovnání křivek pro data z experimentu pro směr T a pro data ze simulace s materiálovými parametry TAH pro směr M

Na obr. 20 lze vidět porovnání experimentálních dat z pádové zkoušky a dat ze simulací jak závislostí posuvu na čase, tak zrychlení na čase. Zde bylo do modelu pádové zkoušky použito materiálových parametrů TAH. Vzhledem k velkým rotacím prvků v simulaci nebylo možné nasimulovat celý průběh pádové zkoušky. Data ze simulace jsou proto zobrazena pouze do času 0,85 s. Zvláště z obr. 20a je dobře patrné, že optimalizovat hledané materiálové parametry pouze pomocí tahové zkoušky, by bylo značně nedostačující.



(a) Závislost posuvu na čase



(b) Závislost zrychlení na čase

Obr. 20: Závislosti z modelu pádové zkoušky při použití parametrů TAH

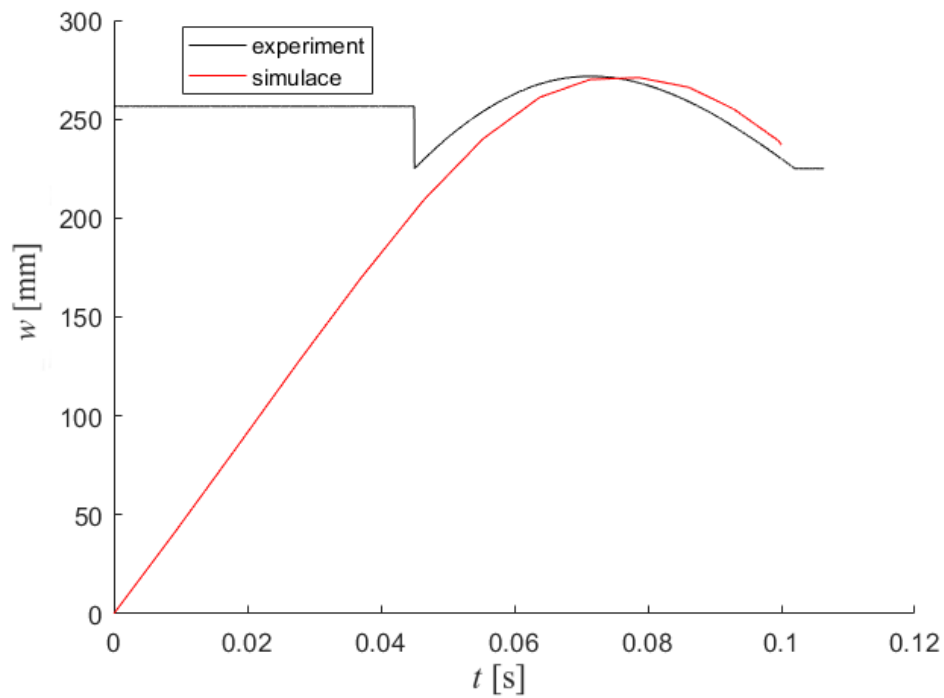
Po ukončení optimalizace materiálových parametrů za pomoci pádové zkoušky byly získány výsledné materiálové parametry (parametry PAD) (uvedeny v tab. 3).

Napětí [MPa]	Plastická deformace [-]
30,0	0,0
153,0	0,053
18,8	0,359
66,5	0,632
1000,0	1,496
2940,0	1,952
4540,0	2,127
7840,0	2,654
Youngův modul pružnosti [MPa]	110

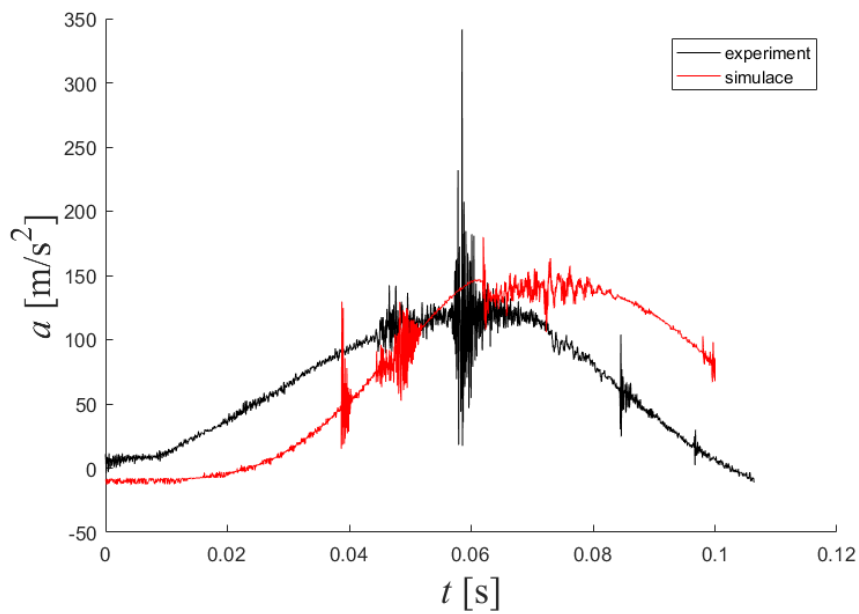
Tab. 3: Materiálové parametry PAD

Na obr. 21 lze vidět porovnání závislosti posuvu na čase, kdy bylo simulací dosaženo téměř stejného maximálního posuvu jako při experimentu.

Dále je na obr. 22 zobrazeno porovnání zrychlení ze simulace a z experimentu. I tady lze říci, že maximální hodnoty zrychlení jsou podobné za předpokladu, že není uvažována měřená extrémní hodnota 350 ms^{-2} .

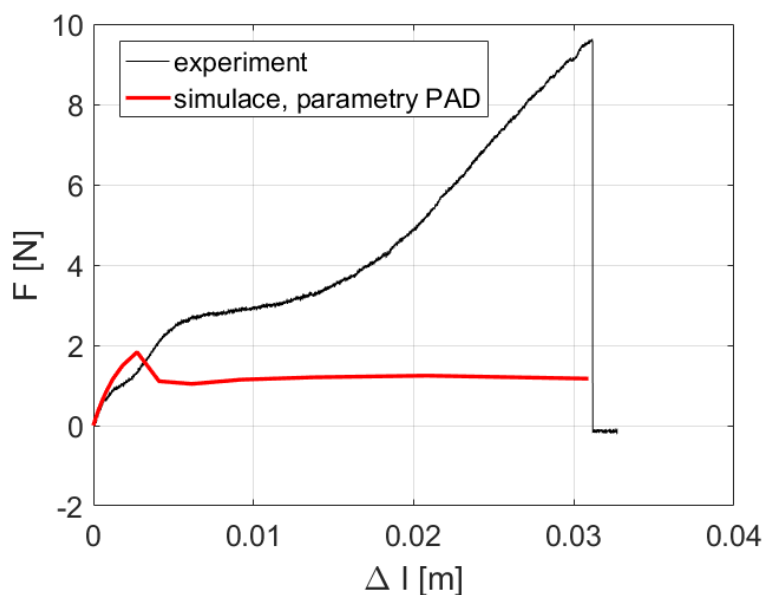


Obr. 21: Porovnání křivek závislostí posuvu na čase



Obr. 22: Porovnání křivek závislostí zrychlení na čase

Dosadí-li se výsledné materiálové parametry PAD do modelu zkoušky tahové (obr. 23), je zřejmá výrazná neshoda vyjma oblasti platnosti Hookova zákona, kde je shoda postačující. Tato neshoda je zřejmě způsobena závislostí na rychlosti deformace, která se v tahových zkouškách neprokázala, neboť rychlosti při tahových zkouškách, na rozdíl od zkoušky pádové, byly malé.



Obr. 23: Porovnání křivek závislostí posuvu na čase

6 Závěr

V této práci byly identifikovány materiálové parametry (parametry PAD) izotropně elasto-plastického materiálového modelu LLDPE fólie. Získané parametry lze brát jako vstupní parametry pro složitější materiálové modely, které by zohlednily anizotropii materiálu či vliv rychlosti na deformace.

Materiálové parametry byly nalezeny na základě optimalizace pomocí modelů tahové a pádové zkoušky. Tahová zkouška provedená ve směru T i směru M odhalila, že se materiál fólie nechová izotropně. Ze změřených sil potřebných pro natažení vzorku do určité vzdálenosti bylo možné vyhodnotit závislosti síly na prodloužení, které ukázaly, že v tahových zkouškách provedené rychlosti deformace neměly na tyto síly příliš velký vliv. Z pádové zkoušky dále vyplynulo, že se stoupajícím počtem vrstev fólie a s klesající pádovou výškou klesaly hodnoty posuvů.

Pro získání přesnějších parametrů LLDPE fólie by bylo zapotřebí dalších optimalizací pro jiný počet vrstev fólie, jiných pádových výšek či zdokonalení samotného materiálového modelu. Také by bylo vhodné fólii při pádové zkoušce modelovat jako jednotlivé vrstvy, kdy mezi těmito vrstvami dochází ke tření.

Materiálové parametry LLDPE fólie byly hledány zejména kvůli možnému využití této fólie v bezpečnostním systému Nanobag a jeho následné použití při simulaci crash testů. Pro orientační určení, zda je tento materiál pro systém Nanobag vhodný, jsou získané materiály postačující.

Seznam literatury

- [1] Zi Ren, Zing Shi, Xuerong Zao, Zujing Tang, Li-Yhi Liu. *Different Dependence of Tear Strength on Film Orientation of LLDPE Made with Different Co-Monomer*. 2019. Dostupné z WWW: <https://pdfs.semanticscholar.org/d99e/973ba6bb226f4c7839ad99584e630bee48b7.pdf?_ga=2.240369866.870127279.1590577335-118936862.1590577335>.
- [2] Mohammad Motaher Hossain, Akash Abaji Kadam, Chin-Fu Lee, Hung-Jue Sue, David M. Fiscus. *Numerical modeling of essential work of fracture on ductile polymer films*. 2019. Dostupné z WWW: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0013794419301134?token=757E23C98E39D77C9D1C0118117EF7391E82A788C2CE07AD836D4B3F7\055EDC6B3FB5542B3B3F6C044D1CB5BCA510C82>>.
- [3] M. Kroon, E. Andreasson, E. Persson Jutemar, V. Pteresson, L. Prsson, M. Dorn, P.A.T Olsson. *Anisotropic Elastic-Viscoplastic Properties at Finite Strains of Injection-Moulded Low-Density Polyethylene*. 2017. Dostupné z WWW: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11340-017-0322-y>>.
- [4] Necmi Dusunceli, Ozgen U. Colak. *High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling*. 2007. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/225889572_High_density_polyethylene_HDPE_Experiments_and_modeling>.
- [5] Jakub Vojáček. *Mechanické vlastnosti LLDPE fólií v závislosti na jejich složení*. 2015. Dostupné z WWW: <<https://core.ac.uk/download/pdf/30296303.pdf>>.
- [6] Khaled Mezghani, Sarfaraz Furquan. *Analysis of dart impact resistance of low-density polyethylene and linear low-density polyethylene blown films via an improved instrumented impact test method*. 2018. Dostupné z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.919.1568&rep=rep1&type=pdf>>.

- [7] F. Rueda, J.P. Torres, M. Machado, M. Frontini, J.L. Otegui. *External pressure induced buckling collapse of high density polyethylene (HDPE) liners: FEM modeling and predictions*. 2015. Dostupné z WWW: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0263823115001779?token=F13C921D85F2F62CED187F4E6810C053D28D11F61BD885A2669C79BEF25\1C3F5A8079E8CA01DFC052805D7CFC48558E2>>.