

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

NÁVRH RAMENNÍHO
CHRÁNIČE MOTOCYKLISTY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. VÁCLAV HRDLIČKA

VÝPOČTY A DESIGN

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. RADEK KOTTNER, PHD.

PLZEŇ, 2017

Prohlášení

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

V Plzni dne 31. 5. 2017

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Radku Kottnerovi, Ph.D. za přínosné rady, věnovaný čas a věcné připomínky. Velký dík patří samozřejmě mé rodině za veškerou podporu během studia.

Abstrakt

Tato práce obsahuje základní přehled materiálů vhodných pro použití v ochranných prvcích pro motocyklisty včetně shrnutí jejich charakteristických vlastností. Dále se práce zabývá experimentálními zkouškami dílčích materiálů použitých v několika již distribuovaných chráničích pro motocyklisty. Jednalo se o zkoušky tahové, tlakové a pádové. Práce obsahuje také souhrn materiálových modelů sloužících k popisu těchto materiálů. Popsány jsou základní elastoplastické, hyperelastické a viskoelastické materiálové modely. Na jejich základě byla provedena identifikace materiálových parametrů za pomoci výpočtových modelů a optimalizačních metod. Stěžejní částí práce je numerická simulace nárazové zkoušky pro jeden typ chrániče dle příslušné normy, zajišťující ochranu motocyklisty. Posledním bodem práce jsou návrhy modifikací chrániče z hlediska získání lepších užitných vlastností či zlevnění výroby.

Klíčová slova

Chránič, materiály absorbující energii, voština, kůže, pěna, experiment, elastoplastičita, hyperelastičita, viskoelastičita, MKP, optimalizace, identifikace, numerická simulace, modifikace

Abstract

This thesis contain a basic overview of materials usable in motorcycle armors including a summary of their characteristic properties. The thesis is also concerned with experimental tests of partial materials used in several already distributed motorcycle armors. It was about tensile, compressive and drop tests. The thesis also include overview of the material models, which serve for description of this materials. Basic elastoplastic, hyperelastic and viscoelastic material models are described. Based on this, identification of material parameters using computational models and optimization methods was executed. The core part of thesis is the numerical simulation of impact test for one type of armor according to the relevant standard, which secure protection of motorcyclist. The last point of the thesis are modifications of the armor in terms of gaining better performance or cost of production.

Keywords

Armor, energy absorbing materials, honeycomb, leather, foam, experiment, elastoplasticity, heperelasticity, viscoelasticity, FEM, optimization, identification, numerical simulation, modification

Použité veličiny

<i>symbol</i>	jednotka	název
C_{ij}	Pa	materiálové parametry pro Mooney-Rivlinův model
D_k	Pa^{-1}	parametr stlačitelnosti pro Mooney-Rivlinův model
E	Pa	Youngův modul pružnosti
\mathbf{E}	-	Green-Lagrangeův tenzor deformace
E_k	J	pohybová energie
f	-	součinitel smykového tření
F_i^{exp}, F_j^{exp} a F_k^{exp}	N	hodnoty sil z tlakových zkoušek pěnové části
F_i^{model}, F_j^{model} a F_k^{model}	N	hodnoty sil z modelu pěnové části
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	tíhové zrychlení
g_1	-	parametr Pronyho řady
h_i	m	výšky
I_1, I_2	-	deformační invarianty
\bar{I}_1, \bar{I}_2	-	přepočtené invarianty hlavních deformací
J	-	poměr mezi deformovaným a výchozím objemem
K_i	Pa	relaxační moduly
K_∞	Pa	rovnovážný modul
m	kg	hmotnost
\mathbf{S}	-	2. Piola-Kirchhoffův tenzor napětí
t	s	čas
v_i	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	dopadové rychlosti
W	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota deformační energie
α_k	-	materiálový parametr pro Ogdenův model
ε	-	deformace
$\dot{\varepsilon}$	s^{-1}	rychlost deformace
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	-	poměrná prodloužení
μ_k	Pa	materiálový parametr pro Ogdenův model
ν	-	Poissonovo číslo
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
σ_i	Pa	napětí určené funkcí hustoty deformační energie
σ_i^{test}	Pa	napětí naměřené při tahové zkoušce kožené části
τ_i	s	relaxační časy

Použité zkratky a výrazy

zkratka	název
C3D8	trojrozměrný konečný prvek
EPS	expandovaný polystyren
FEM	Finite Element Method
ISO	International Organization for Standardization
KME	Katedra mechaniky
MKP	metoda konečných prvků
SW	software
ZČU	Západočeská univerzita

Seznam obrázků

2.1	Kolenní slider Dikobraz	4
2.2	Chránič páteře	4
2.6	Schéma struktury voštinové pěny	6
2.7	Moderní materiál KOROYD	8
2.8	Materiál s příhradovou konstrukcí	8
2.3	Tři části závislosti síly na stlačení pro materiál absorbující energii	9
2.4	Schéma mikrostruktury open cell pěny	9
2.5	Schéma mikrostruktury closed cell pěny	9
3.1	Pěnové chrániče SCL2 (vlevo) a SCL1-42 (vpravo)	11
3.2	Řez chráničem PSÍ s popisem	11
3.3	Mikrostruktura pěnového materiálu použitého v chrániči SCL2 (vlevo) a detail voštinové struktury z chrániče PSÍ (vpravo)	12
3.4	Detail povrchu kůže (vlevo) a rozhraní kůže a pěny (vpravo), chránič PSÍ .	12
3.5	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $0,01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	13
3.6	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	14
3.7	Popis padostroje	15
3.8	Závislost kontaktní síly na čase pro všechny dopadové rychlosti - SCL2 . .	16
3.9	Závislost kontaktní síly na čase pro všechny dopadové rychlosti - SCL1-42 .	17
3.10	Plastové vzorky před provedením tahové zkoušky a po porušení	18
3.11	Typická závislost síla-posuv pro tahovou zkoušku	18
3.12	Vzorek pro tlakovou zkoušku	19
3.13	Šestiúhelníkové buňky	19
3.14	Vzorek před zatížením (vlevo) a během zatížení (vpravo)	19
3.15	Závislost síla-stlačení pro tlakovou zkoušku	19
3.16	Perforovaný (vlevo) a neperforovaný (vpravo) vzorek	20
3.17	Geometrie vzorku kůže	20

3.18	Vzorek na začátku zkoušky (vlevo) a po porušení (vpravo)	21
3.19	Referenční závislosti napětí-deformace pro vzorky kůže	21
3.20	Vzorek pro tlakovou zkoušku	22
3.21	Vzorek před zatížením	22
3.22	Vzorek ve fázi relaxace	22
3.23	Vzorek po odlehčení	22
3.24	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	23
3.25	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	23
3.26	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	23
3.27	Detail závislosti síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	24
3.28	Zkušební oblasti	25
4.1	Celková deformace (přetvoření) pro elastoplastický model	28
4.2	Základní elastoplastické modely	29
4.3	Schéma Maxwellova modelu (vlevo) a Pronyho řad	32
5.1	Konečnoprvková síť modelu pro tahovou zkoušku	34
5.2	Definice okrajových podmínek pro tahovou zkoušku	34
5.3	Porovnání modelu s experimentem pro tahovou zkoušku plastu	35
5.4	Rozdělení geometrie na dvě sekce	36
5.5	Definice okrajových podmínek pro tlakovou zkoušku	38
5.6	Definice posuvu razníku pro tlakovou zkoušku	38
5.7	Porovnání závislostí síla-stlačení pro oba experimenty a MKP model	39
5.8	Vizualizace pro model tlakové zkoušky (vlevo) v porovnání s deformovaným skutečným vzorkem (vpravo)	40
5.9	Porovnání závislostí napětí-deformace pro experimenty a MKP modely vzorků kůže	41
5.10	Popis axisymetrického modelu tlakové zkoušky	42
5.11	Vývojový diagram optimalizačního procesu	44
5.12	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	46
5.13	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	47
5.14	Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	47
6.1	Schéma zařízení pro nárazovou zkoušku dle normy ČSN EN 1621-1	48
6.2	Geometrické modely chráničů SCL2 (vlevo) a SCL1-42 (vpravo)	49
6.3	Konečnoprvková síť pro razník (a), podložku (b) a základnu (c)	50

6.4	Konečnoprvková síť pro pěnu a kůži (a) a plastovou část - detail voštinového dílu (b) a nevoštinový díl (c)	50
6.5	Popis okrajových podmínek v rovinách symetrie	51
6.6	Okrajová podmínka na pěnové části vzorku	52
6.7	Výsledná kontaktní síla pro chránič PSÍ	53
6.8	Výsledná kontaktní síla pro chránič PSÍ bez voštinové části plastu	54
6.9	Vizualizace vzorku chrániče na začátku zkoušky	55
6.10	Vizualizace vzorku chrániče v okamžiku maximální kontaktní síly	55
6.11	Vizualizace vzorku chrániče po odlehčení	56
7.1	Výsledná kontaktní síla při tloušťce pěnové části 6,6 mm	58

Seznam tabulek

3.1	Rozměry pro zkušební oblasti	25
5.1	Parametry elastoplastického modelu pro tahovou zkoušku	35
5.2	Youngův modul a parametry elastoplastického modelu pro tlakovou zkoušku	39
5.3	Identifikované parametry Ogdenova modelu pro vzorky kůže	40
5.4	Rozsahy materiálových parametrů pro optimalizaci	45
5.5	Nastavení evolučního algoritmu	46
5.6	Výsledné hodnoty materiálových parametrů pro pěnové vzorky chrániče PSÍ	46
7.1	Kontaktní síly při snižování tloušťky pěnové části	57
7.2	Kontaktní síly pro příslušné tloušťky kožené části	58

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
1.2	Cíle práce	2
2	Vznik a vývoj ochranných prvků	3
2.1	Historie ochranných prvků	3
2.2	Současný stav	5
2.2.1	Současné ramenní chrániče	5
2.2.2	Konvenční materiály absorbující energii	5
2.2.3	Moderní materiály absorbující energii	7
3	Experimentální zkoušky	10
3.1	Zkoumané typy ramenních chráničů	10
3.2	Zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL2	13
3.2.1	Tlakové zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL2	13
3.2.2	Pádové zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL2	14
3.3	Zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL1-42	16
3.4	Zkoušky pro chránič PSÍ	17
3.4.1	Tahová zkouška plastové části	17
3.4.2	Tlaková zkouška plastové části	18
3.4.3	Tahová zkouška kožené části	20
3.4.4	Tlaková zkouška pěnové části	21
3.5	Nárazová zkouška dle normy ČSN EN 1621-1	24
4	Materiálové modely	27
4.1	Elastoplastický model	27
4.2	Hyperelastický model	29
4.3	Viskoelastický model	31

5	Identifikace materiálových parametrů	33
5.1	Parametry pro chránič PSÍ	33
5.1.1	Výpočtový model tahové zkoušky plastové části	33
5.1.2	Výpočtový model tlakové zkoušky plastové části	35
5.1.3	Výpočtový model tahové zkoušky kožené části	40
5.1.4	Výpočtový model tlakové zkoušky pěnové části	41
6	Simulace nárazové zkoušky	48
7	Modifikace	57
8	Závěr	60

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

Motocykl je stroj, který může sloužit jako dopravní či závodní prostředek. V obou případech je však nezbytné, aby byl jeho řidič (případně i spolujezdec) chráněn řadou ochranných prvků. Mezi ně patří helma, páteřní chránič, ale i mnoho chráničů kloubních, jako např. kolenní, loketní či ramenní. Právě ramenním chráničům pro motocyklisty je věnována tato diplomová práce.

Motocyklista je při nehodě (nárazu) vystaven vlivu velkého množství energie, a proto materiály, jež jsou používány pro výrobu ochranných prvků, musí energii vhodně absorbovat. Často je pro tyto účely použito různých pěnových materiálů (např. D3O), ale také např. plastů s voštinovou strukturou. Použitelnost materiálů pro tlumení nárazu je však omezena velikostí kontaktní síly působící na motocyklistu. Ta nesmí vzrůst nad zdraví bezpečné hodnoty.

Ochranné prvky pro motocyklisty musí pochopitelně odpovídat patřičným technickým normám. Řada firem, které ochranné prvky vyrábí, ke zkouškám ověřujícím to, zda chránič normě vyhovuje, přistupují bez předchozí počítačové simulace. Ta však může posunout vývoj ochranných prvků mnohem dále a s její pomocí lze vyvinout chrániče s lepšími užitnými vlastnostmi či snížit jejich výrobní náklady.

1.2 Cíle práce

Jedním z cílů práce bylo sestavení rešerše, v rámci níž jsou zmíněny nejen pro účely ochrany motocyklisty aktuálně používané materiály včetně jejich mechanismů absorpce energie, ale také materiály s potenciálem být do budoucna používány a historické milníky v oblasti vývoje ochranných prvků. Hlavním cílem práce bylo sestavení numerického modelu typu chrániče, jenž je distribuovaný firmou Psí Hubík, dle normy ČSN EN 1621-1, jež se věnuje ochranným oděvům pro motocyklisty. K tomu bylo potřeba identifikovat materiálové parametry dílčích materiálů, z nichž byl zkoumaný typ chrániče vyroben. Pro tyto účely byly provedeny experimentální zkoušky vzorků materiálů, na jejichž základě byly vytvořeny výpočtové modely a optimalizační procesy vedoucí k identifikaci parametrů. Experimentální zkoušky podstoupily i materiály dvou pěnových chráničů v současnosti již také používaných. Pro ně byly sestaveny geometrické modely, které společně s výpočtovým modelem celé zkoušky budou moci být použity v rámci budoucích prací na KME ZČU pro numerickou simulaci zkoušky těchto pěnových chráničů. V práci jsou rovněž popsány materiálové modely použité pro popis jednotlivých dílčích materiálů chrániče firmy Psí Hubík. Výstupy numerické simulace nárazové zkoušky pro daný typ chrániče prokázaly v porovnání s reálným experimentem důvěryhodnost modelu. Vytvořením modifikací chrániče byly navrženy změny v geometrii a rozměrech vedoucí k dosažení větší bezpečnosti a snížení výrobních nákladů tak, aby stále platily požadavky dány ČSN EN 1621-1.

Kapitola 2

Vznik a vývoj ochranných prvků

2.1 Historie ochranných prvků

První, tenkrát ještě párou poháněný motocykl spatřil světlo světa roku 1869. Benzínem poháněné stroje vznikají od roku 1885. Ranná ochrana motocyklistů však přišla až během první světové války, ve které motocykly našly své uplatnění na poli kurýrní, ale i sanitní či průzkumné služby. Tehdejší podšité kožené kabáty či bundy a nohavice, těžké boty a přilby mohly ve většině případů splnit svou funkci, avšak z estetického hlediska nešlo ještě o nic moderního a pohodlného [17].

V obecném povědomí jsou nejznámějšími součástmi výbavy motocyklisty helma sloužící k ochraně hlavy a kožená bunda (kombinéza), která však v průběhu několika desetiletí prošla také vývojem a od vrstvy kůže na těle řidiče, která chránila jen proti odřeninám, se vyvinula v obranný štít, pod kterým se skrývají další ochranné prvky, jako jsou chrániče ramen, kolen, loktů, páteře či krku. Změnila se také materiálová skladba bundy. V současné době se často používá kevlar či nylon [11].

Od 70. let 20. století začali někteří vývojáři ve spolupráci s předními motocyklovými závodníky přicházet na nové směry ochrany motocyklistů. Různé inovace vznikly ze spolupráce italského výrobce sportovního oblečení Lina Daineseho se závodníky Moto Grand Prix, kterými byli mimo jiné patnáctinásobný mistr světa Giacomo Agostini nebo první americký vítěz závodu Grand Prix Kenny Roberts. V dobách, kdy závodníci považovali každý gram navíc na kombinéze za zbytečnou přítěž, dokázal Giacomo Agostini v kombinéze od Lina Daineseho, že hmotnost není vše a bezpečnější a ergonomičtější kombinéza jej proti tvrzením jeho soupeřů nijak neomezovala v pohybu [16].

Dalším přelomovým ochranným prvkem z dílen italského průkopníka byl kolenní slider, který je dodnes známý pod jménem „Dikobraz“. Na přelomu 70. a 80. let populární závody Daytona 200 byly určeny pro silné, tenkrát ještě dvoutaktní stroje o objemu 750 ccm a jezdci na nich musely do zatáček najíždět pod velkými náklony, aby přenesly těžiště co nejnižší. Již zmiňovaný Roberts jezdil ze všech závodníků největší náklony, a tak měl po každém závodě rozedřenou kombinézu na kolenou. Vše řešila až Daineseho myšlenka plastových výčnělků, které se při ohnutí kolene vysouvaly ven (obr. 2.1). Ještě více přelomovým okamžikem ve vývoji ochranných prvků pro motocyklisty byl první chránič páteře. Krunýřový systém spojených lamel (obr. 2.2) čerpal inspiraci opět ve světě zvířat, konkrétně u pásovce a i zde byl u jeho vzniku Dainese [16].



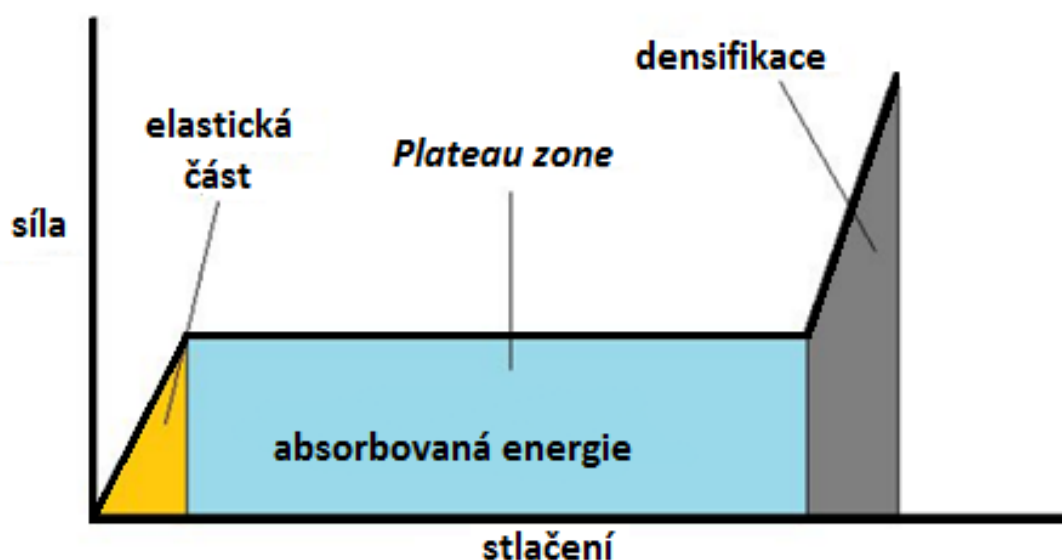
Obrázek 2.1: Kolenní slider Dikobraz [16] Obrázek 2.2: Chránič páteře [16]

Přes nové typy kombinéz a vývoj páteřního chrániče došlo během 80. let i na rozvoj anatomicky tvarovaných chráničů, jež se do kombinéz vkládaly na nejvíce postižitelná místa, kterými byly především klouby. Cílem těchto chráničů byla bezpečnost, ale i pohodlnost. Proto jejich vnitřní část byla tvořena měkkými materiály, přičemž pevnost zajišťovala část vnější. Tak vznikly první kompozitní chrániče pro motocyklisty. Všití takovýchto ochranných prvků přímo do kombinéz bylo motivováno snahou rozložit sílu vzniklou nárazem na co největší plochu. Tato myšlenka dovolila výrobu lehčích a tenčích typů chráničů, které jsou pro ochranu ramen, paží, loktů, kolen a holení používány až do současnosti [16].

2.2 Současný stav

2.2.1 Současné ramenní chrániče

Dnešní ramenní chrániče všité pod kombinézu existují v několika provedeních. Pro jejich výrobu se používají různé pěnové materiály, ale i silikonové gely, tvrdé plasty či různé kombinace výše zmíněného [10]. Hlavním požadavkem na tyto materiály je co největší schopnost absorpce energie. Ta je snadno zjistitelná z grafu závislosti síly na stlačení při zatížení tlakem (obr. 2.3) [5].

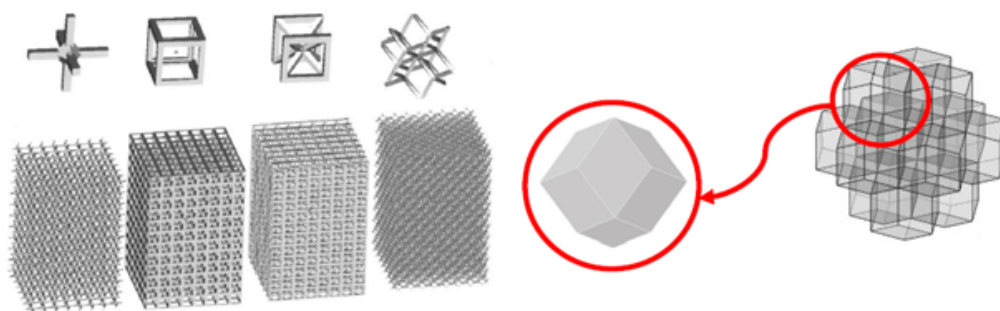


Obrázek 2.3: Tři části závislosti síly na stlačení pro materiál absorbující energii

Tento graf lze členit na tři části – elastickou, tzv. *Plateau zone* a oblast densifikace. Materiál je sice tím vhodnější pro použití na tlumení nárazu, čím je hodnota integrálu z funkce popisující závislost síly na stlačení (absorbovaná energie) větší, ovšem výrazné omezení absorbované energie spočívá ve velikosti síly. Ta nesmí přesáhnout hodnotu, jež by odpovídala kontaktní síle při nárazu, která by vystavila motocyklistu riziku zranění. Pro ideální materiál by tak měla síla minimální hodnoty, ale plocha pod grafem by byla co největší [5].

2.2.2 Konvenční materiály absorbující energii

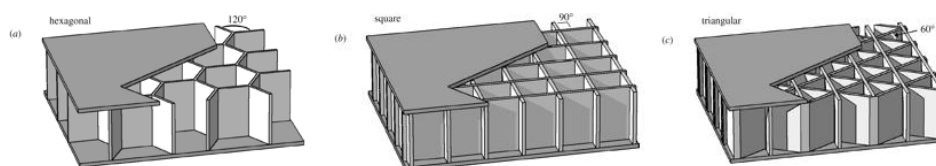
Mezi konvenční materiály absorbující energii se dají řadit především buněčné materiály jako různé pěny, či kompozitní lamináty. Pěnové materiály lze dělit dle jejich vnitřní struktury. Používané jsou pěny s otevřenou (obr. 2.4, tzv. *open cell foams*) či uzavřenou strukturou (obr. 2.5, tzv. *closed cell foams*), lišící se otevřeností či uzavřeností buněk na mikroúrovni a mechanismem absorpce energie [5].



Obrázek 2.4: Schéma mikrostruktury open cell pěny [5] Obrázek 2.5: Schéma mikrostruktury closed cell pěny [5]

Mechanismus absorpce energie u tzv. *open cell foams* je založen na deformaci hran, ze kterých se struktura skládá. Ty jsou namáhány na ohyb a vzpěr. U tzv. *closed cell foams* je absorpce energie také založena na deformaci hraničních ploch struktur, navíc však plyn zachycený uvnitř struktury může ovlivnit mechanické vlastnosti pěnového materiálu. Ztuhnutím buňky dojde ke zvýšení stability struktury.

Struktura pěny může mít i další podoby, např. šestiúhelníkové, trojúhelníkové či kosčtverečné prismatické buňky, jak je patrné z obr. 2.6. Všechny takové struktury lze souhrně označit jako voštinové. Princip mechanismu absorpce voštinových pěn je opět založen na deformaci struktury, ovšem zde může být s výhodami využito toho, že voština má v různých směrech jiné mechanické vlastnosti. U voštinové pěny tak závisí absorpce energie i na směru zatěžování.



Obrázek 2.6: Schéma struktury voštinové pěny [5, 9]

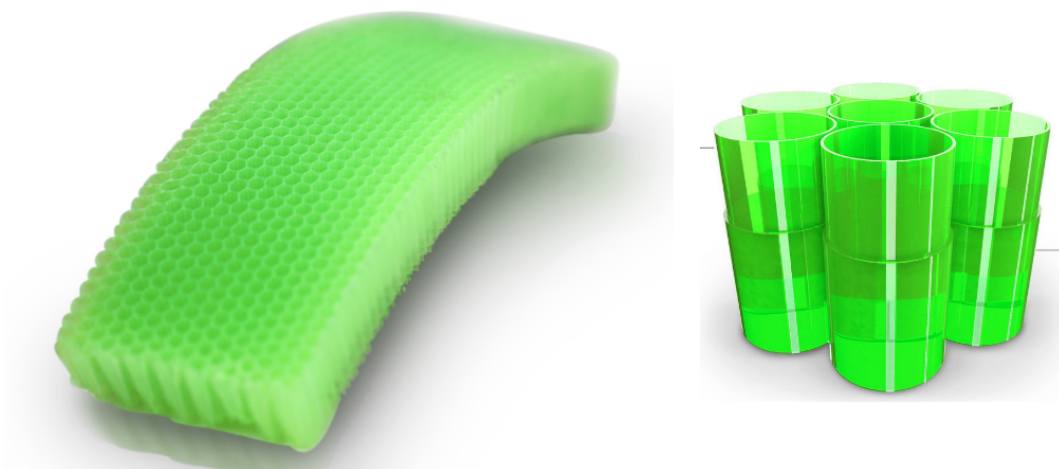
Kompozitní materiály vykazují také dobrou schopnost absorpce energie, při jejich použití je však potřeba dbát na způsoby jejich poškození a porušení. Může dojít jak k porušení vláken, tak matrice, tak například i k delaminaci jednotlivých vrstev laminátu. Porušení kompozitu zaleží i na navržené geometrii, skladbě a orientaci jednotlivých vrstev. Optimalizačními algoritmy tak lze navrhnout vhodné parametry kompozitu tak, aby bylo dosaženo co největší absorpce energie [5].

2.2.3 Moderní materiály absorbující energii

Díky pokročilým výrobním procesům je možné vytvořit strukturu kombinující tzv. *open cell foams* a *closed cell foams*. Vzhledem ke kontrolovatelnosti struktury buněk je dosažena i regulovatelnost úniku vzduchu z pěnového materiálu. Vzniklý materiál má tak malou tuhost při kvazistatickém zatěžování, neboť vzduch ze struktury unikne, a velkou tuhost při rychlých dynamických nárazech, protože v takovém případě vzduch unitř struktury zůstane. Zástupci takových materiálů jsou D3O nebo PORON.

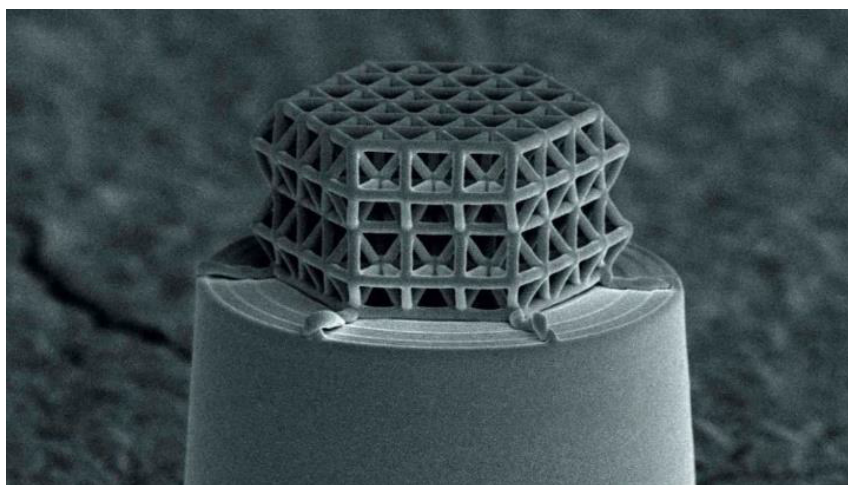
Další z materiálů použitelných pro ochranné prvky je EPS, jenž je využíván především u helem. Tento levný materiál také vykazuje dobrou schopnost absorpce energie. Ovšem má tu nevýhodu, že při použití vrstev o větších tloušťkách není tak stlačitelný jako např. *open-closed cell foams*, neboť dojde k jeho poškození, což negativně ovlivní množství absorbované energie [5].

V rámci výroby a vývoje ochranných prvků začalo být s výhodou využíváno voštinových struktur nejen u pěnových materiálů ale např. i u plastů. Mechanismus absorpce energie spočívá v deformaci a následné destrukci voštinového jádra. Takové struktury jsou často k vidění v kombinaci s dalšími materiály, především pěnovými. Geometrii voštiny lze také vhodně optimalizovat, pro dosažení větší absorpce energie. Voštinovou strukturou se vyznačuje i moderní materiál KOROYD, používaný do helem, jako jádro snowboardů či jako součást kolenního chrániče pro endurové závodníky (obr. 2.7). Jednotlivé trubice struktury jsou složeny z vnitřní a vnější části. Vnitřní část má nízkou hustotu, vysokou tlakovou pevnost a je velmi tenká. Stěna vnitřní části je menší než 0,09 mm. Potáhnutím vnější částí jsou jednotlivé trubice spojeny během výrobního procesu k sobě [15].



Obrázek 2.7: Moderní materiál KOROYD [15]

Dalšími materiály použitelnými především v budoucnosti pro ochranné prvky jsou adaptivní buněčné materiály, schopné měnit své mechanické vlastnosti [3] či materiály s kontrolovanou příhradovou strukturou (viz. obr. 2.8) [7].



Obrázek 2.8: Materiál s příhradovou konstrukcí [18]

Kapitola 3

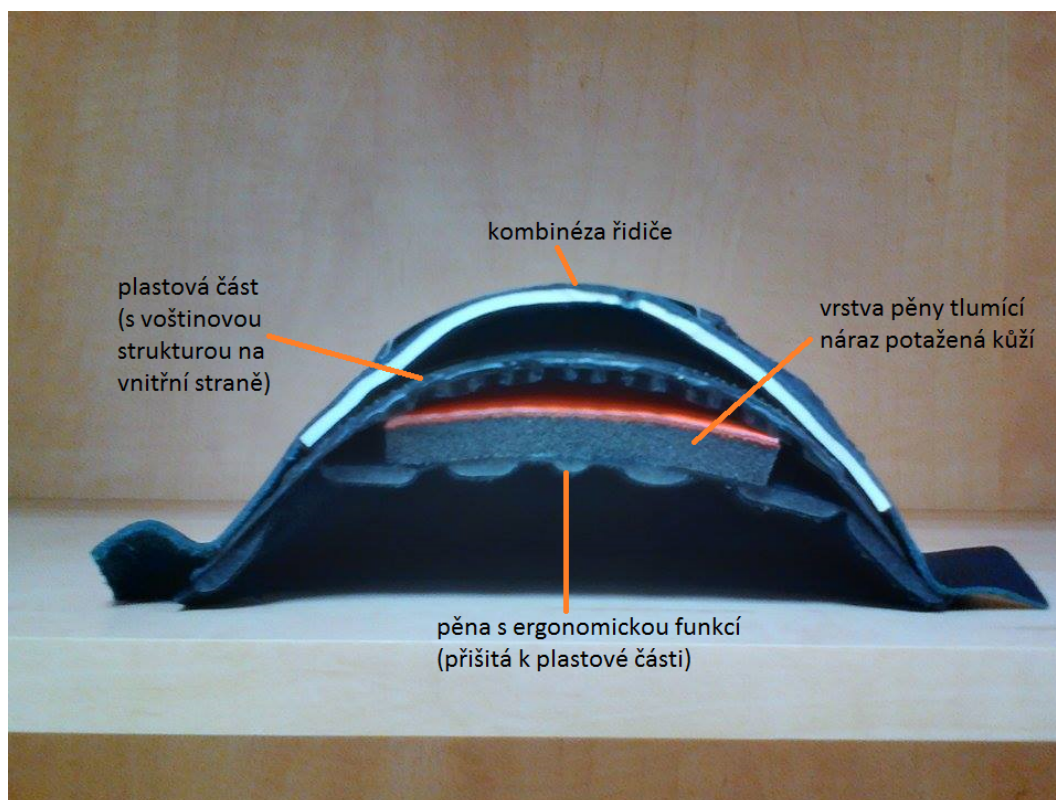
Experimentální zkoušky

3.1 Zkoumané typy ramenních chráničů

Práce se zabývá třemi ramenními (kloubními) chrániči. Jedná se o pěnové chrániče s obchodním označením SAS-TEC SCL2 a SAS-TEC SCL1-42, viz. obr. 3.1, a chránič PSÍ, jenž se směrem od kombinézy k tělu motocyklisty skládá z plastové části s voštinovou strukturou na vnitřní straně a dvou pěnových vrstev. První je určena k tlumení energie a je potažená kůží. Druhá pěnová vrstva je přišita k plastové části a má čistě ergonomické důvody a zajišťuje pohodlí uživatele. Chránič PSÍ včetně popisu je předmětem obr. 3.2. Pohled do mikrostruktury použitých materiálů nabízí obr. 3.3 a 3.4.



Obrázek 3.1: Pěnové chrániče SCL2 (vlevo) a SCL1-42 (vpravo) [12]



Obrázek 3.2: Řez chráničem PSÍ s popisem



Obrázek 3.3: Mikrostruktura pěnového materiálu použitého v chrániči SCL2 (vlevo) a detail voštinové struktury z chrániče PSÍ (vpravo)



Obrázek 3.4: Detail povrchu kůže (vlevo) a rozhraní kůže a pěny (vpravo), chránič PSÍ

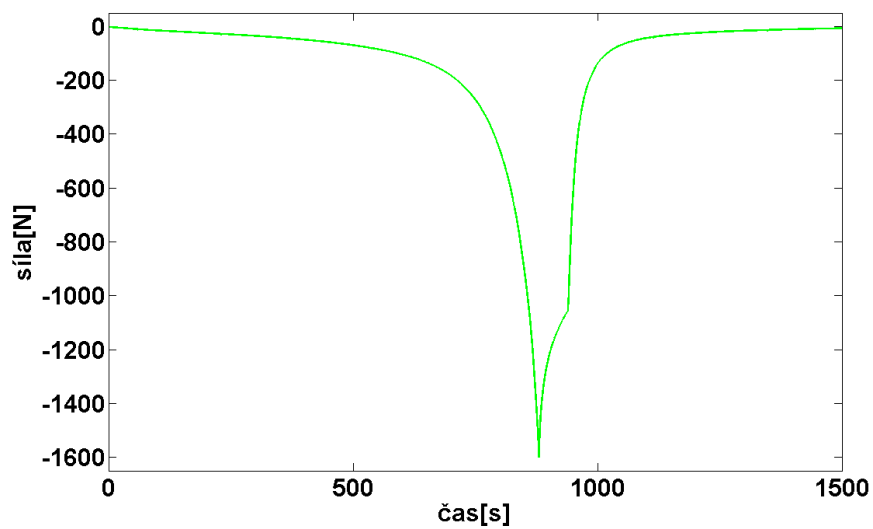
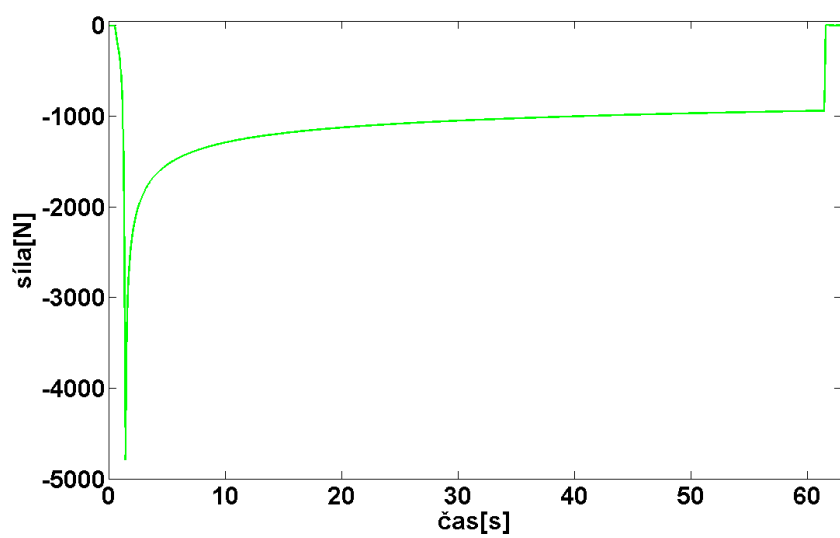
Před sestavením výpočtových modelů pro celou zkoušku dle normy ČSN EN 1621-1 bylo nutné určit materiálové parametry pro všechny dílčí materiály použité ve výše zmíněných testovaných chráničích. Z tohoto důvodu byla uskutečněna řada experimentálních zkoušek popsanych v této kapitole.

3.2 Zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL2

Pro identifikaci materiálových parametrů pěny použité v chrániči s označením SAS-TEC SCL2 byly vyhotoveny dvě zkoušky tlakové a tři pádové.

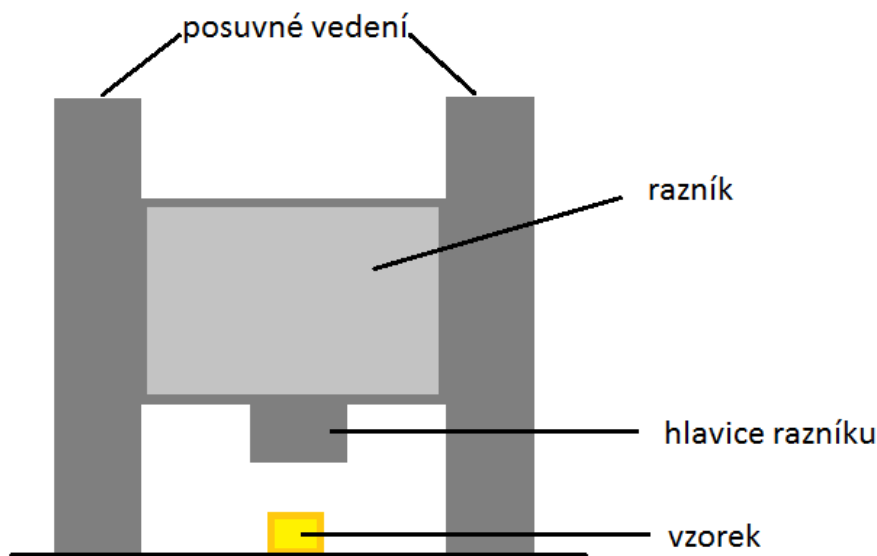
3.2.1 Tlakové zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL2

Tlakové zkoušky byly uskutečněny na přístroji Zwick Roell Z050. Zkoušeny byly dva válcové vzorky o poloměru podstavy 30 mm a výšce 11 mm. První vzorek podstoupil zkoušku o rychlosti deformace $0,909 \text{ s}^{-1}$, což odpovídalo rychlosti zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost zatěžování u druhého vzorku byla $0,01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, rychlost deformace tak byla $0,0009 \text{ s}^{-1}$. Tyto zkoušky byly následně použity pouze pro verifikaci, neboť identifikace parametrů probíhala za pomoci výpočtového modelu pádových zkoušek, jež jsou popsány v následujícím odstavci. Závislosti síly na čase z těchto zkoušek jsou vyobrazeny na obr. 3.5 a 3.6.

Obrázek 3.5: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $0,01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [4]Obrázek 3.6: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [4]

3.2.2 Pádové zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL2

Pádové zkoušky byly uskutečněny na padostroji sestaveném přímo na KME ZČU, jeho schéma je znázorněno na obr. 3.7. Razník pohybující se po posuvném vedení měl hmotnost 2,454 kg a jeho hlavice čtvercový průřez o velikosti 30 mm x 30 mm.

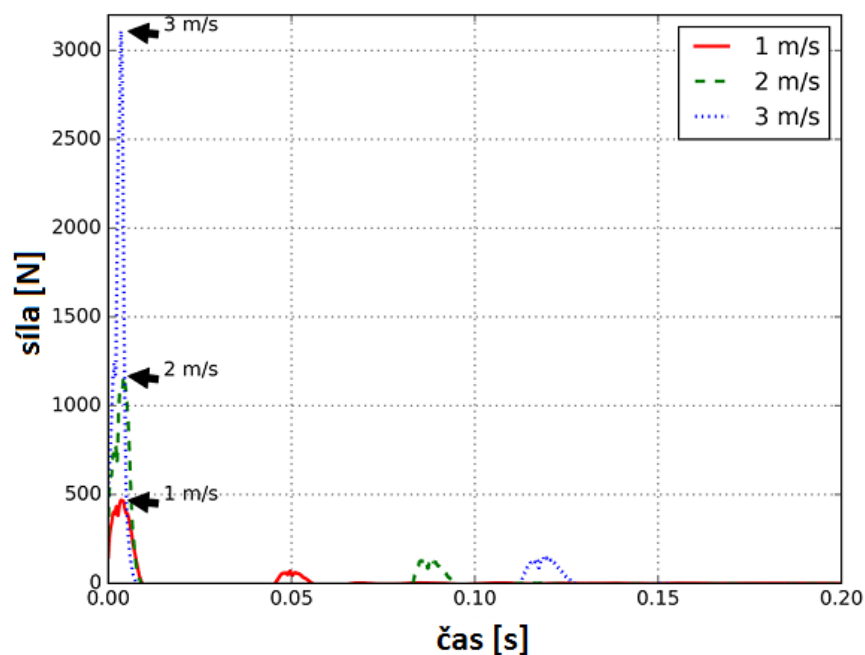


Obrázek 3.7: Popis padostroje

Razník byl na vzorek o výšce 11,1 mm a ploše průřezu 20,7 mm x 19,7 mm puštěn postupně ze tří výšek - $h_1 = 0,051$ m, $h_2 = 0,204$ m a $h_3 = 0,459$ m, které odpovídaly dopadovým rychlostem $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výšky odpovídající dopadovým rychlostem byly vypočteny dle vztahu:

$$h_i = \frac{v_i^2}{2g} \quad (3.2.1)$$

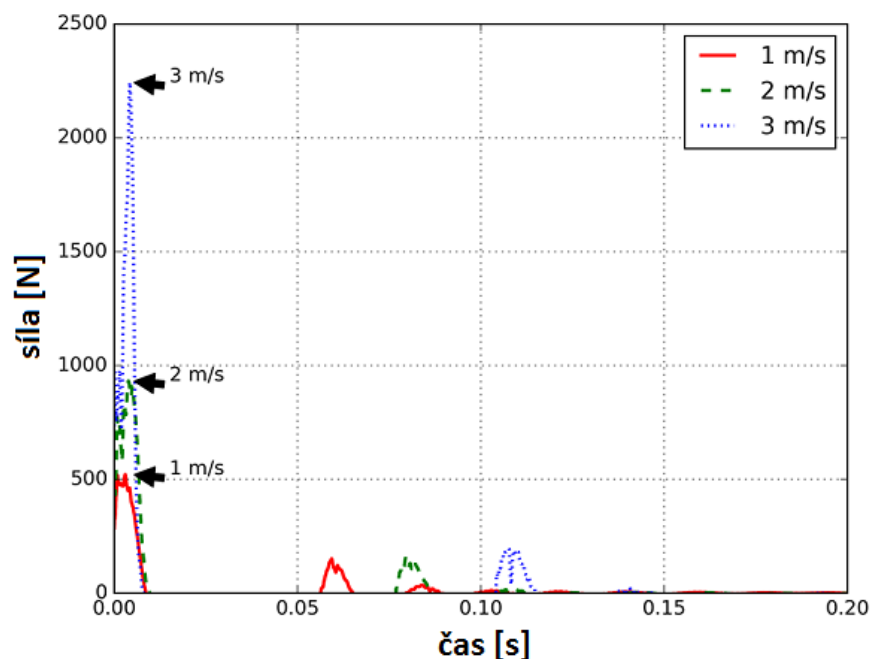
Výstupem zkoušky byla závislost síly na čase pro všechny tři dopadové rychlosti, viz obr. 3.8.



Obrázek 3.8: Závislost kontaktní síly na čase pro všechny dopadové rychlosti - pěna pro SCL2 [4]

3.3 Zkoušky pro chránič SAS-TEC SCL1-42

Pádové zkoušky uskutečněné pro vzorky z chrániče SCL2 byly provedeny na stejném padostroji i pro vzorky z chrániče SCL 1-42. Výšky, ze kterých byl razník puštěn opět odpovídaly dopadovým rychlostem $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vzorky měly výšku 13,3 mm a plochu průřezu 19,3 mm x 18,9 mm. Výstupní závislosti sil na čase pro všechny tři dopadové rychlosti jsou předmětem obr. 3.9.



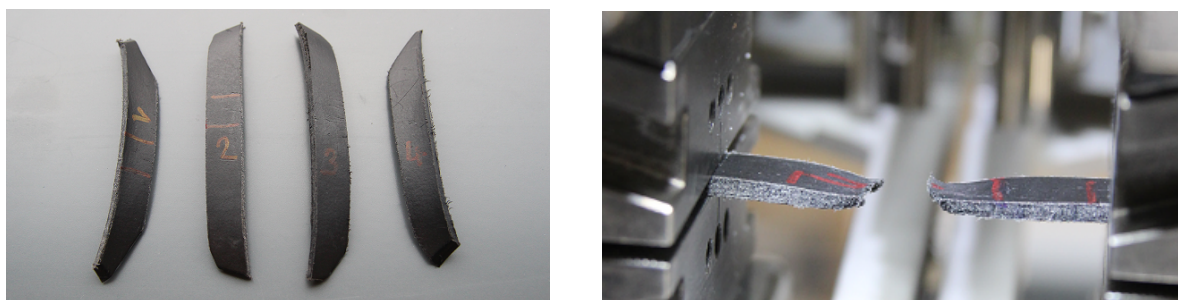
Obrázek 3.9: Závislost kontaktní síly na čase pro všechny dopadové rychlosti - pěna pro SCL1-42 [4]

3.4 Zkoušky pro chránič PSÍ

Pro zjištění materiálových vlastností plastové části chrániče PSÍ byla provedena série tahových a tlakových zkoušek. Jejich účelem bylo zjistit vstupní parametry pro model tlakové zkoušky na vzorku s voštinovou strukturou.

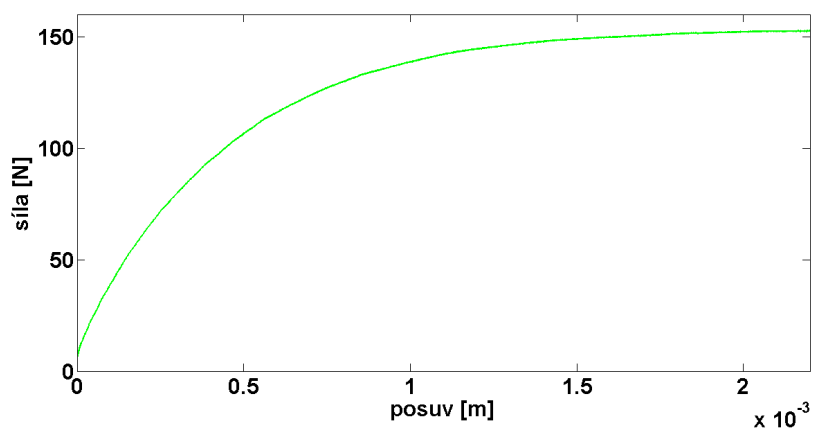
3.4.1 Tahová zkouška plastové části

Tahové zkoušky byly prováděny na vzorcích o velikosti 87 x 10 mm, velikost vzorku mezi čelistmi byla 30 x 10 mm, část mezi extenzometry měřila 10 x 10 mm, tloušťka vzorku byla 2,1 mm. Na přístroji Zwick Roell Z050 byly provedeny čtyři zkoušky, jedna pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ na extenzometru, jedna pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ na příčnicku a dvě pro cyklické zatěžování. Zkoušky byly provedeny až do porušení vzorku (obr. 3.10).



Obrázek 3.10: Plastové vzorky před provedením tahové zkoušky a po porušení

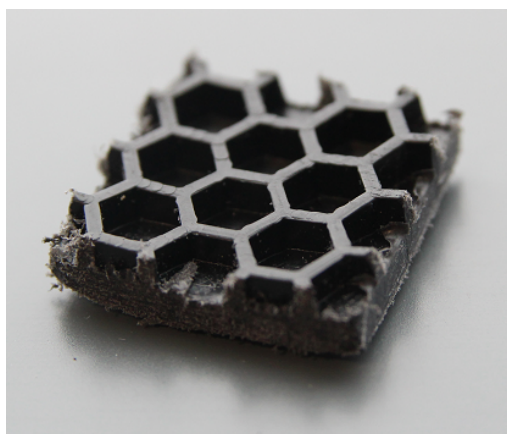
Ze závislostí sil na posuvech získaných z těchto zkoušek byla určena typická závislost pro výpočtový model (obr. 3.11).



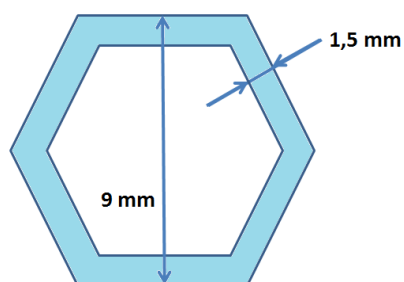
Obrázek 3.11: Typická závislost síla-posuv pro tahovou zkoušku

3.4.2 Tlaková zkouška plastové části

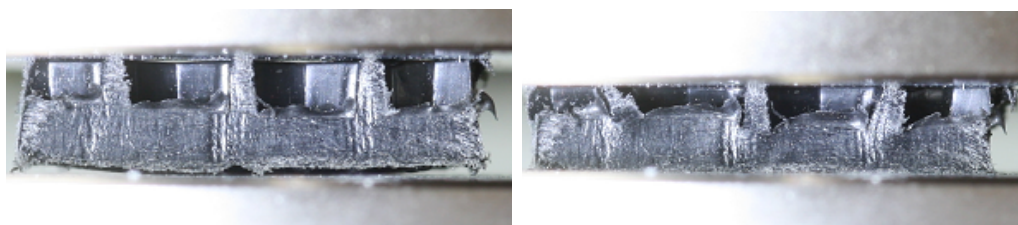
Tlakové zkoušky plastové části chrániče PSÍ byly provedeny na vzorcích s pravidelnou šestiúhelníkovou strukturou o velikosti 26 x 26 mm a výšce 6 mm (obr. 3.12), voštinová část byla vysoká 3,6 mm, rozměry jedné šestiúhelníkové buňky jsou znázorněny na obr. 3.13. Zkoušky byly uskutečněny dvě, obě při rychlosti zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. K realizaci zkoušek byl opět použit přístroj Zwick Roell Z050. Vzdálenost mezi čelistmi před začátkem zkoušky byla 8 mm, extenzometr byl umístěn pod horní čelist. Vzorek před experimentem a v jeho průběhu je na obr. 3.14.



Obrázek 3.12: Vzorek pro tlakovou zkoušku

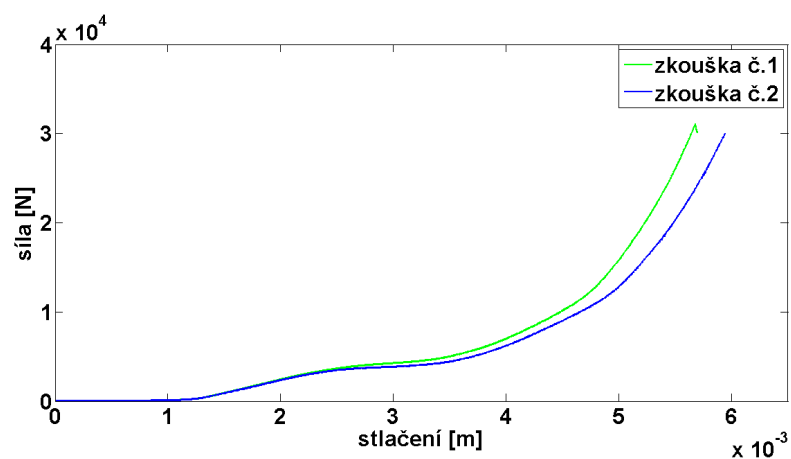


Obrázek 3.13: Šestiúhelníkové buňky



Obrázek 3.14: Vzorek před zatížením (vlevo) a během zatížení (vpravo)

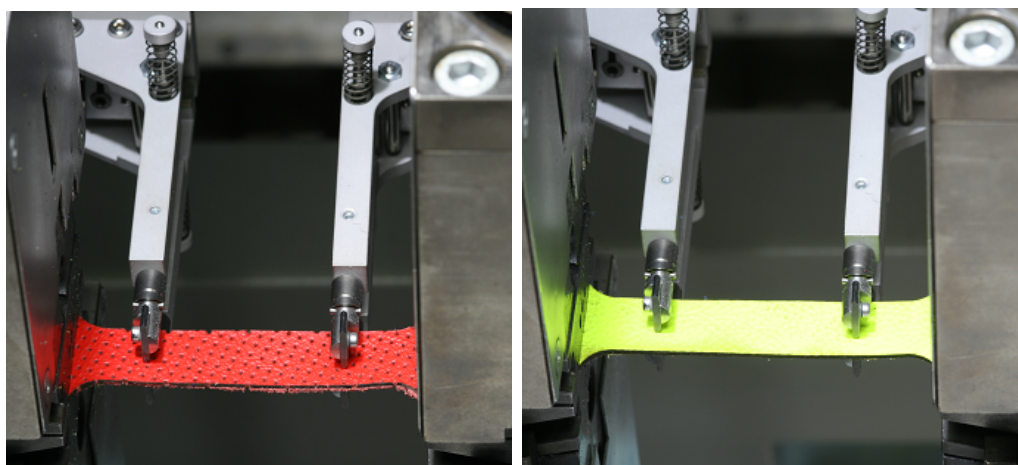
Z obou měření byla opět vyhodnocena závislost síly na stlačení (obr. 3.15). Z té je patrný potenciál materiálů s voštinovou strukturou pro využití v ochranných prvcích.



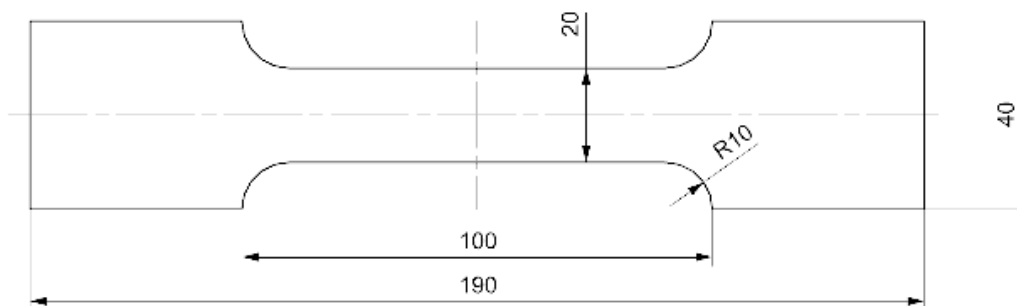
Obrázek 3.15: Závislost síla-stlačení pro tlakovou zkoušku

3.4.3 Tahová zkouška kožené části

Cílem tahové zkoušky kožených vzorků z části chrániče PSÍ bylo určení závislosti nominální napětí-nominální deformace potřebných pro identifikaci materiálových parametrů. Byly testovány perforované i neperforované vzorky (obr. 3.16) o geometrii odpovídající standardu ISO (obr. 3.17) [1].



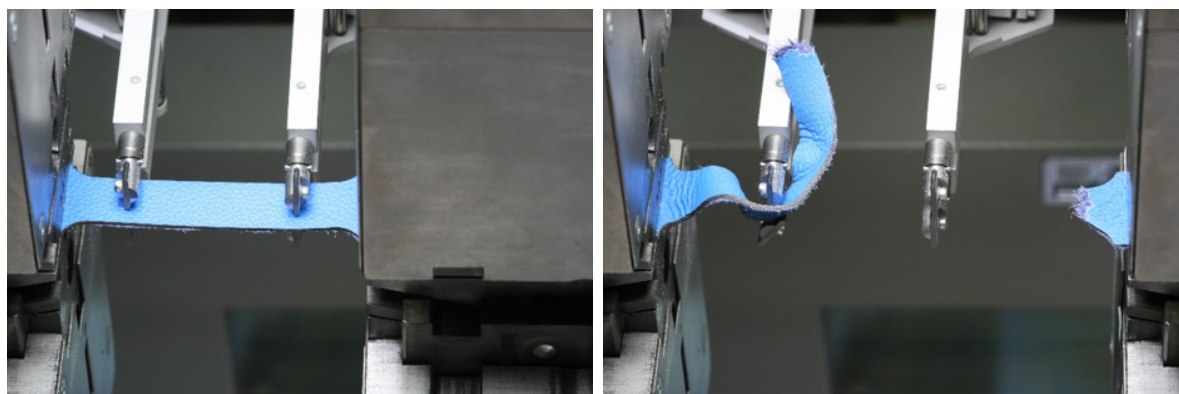
Obrázek 3.16: Perforovaný (vlevo) a neperforovaný (vpravo) vzorek [1]



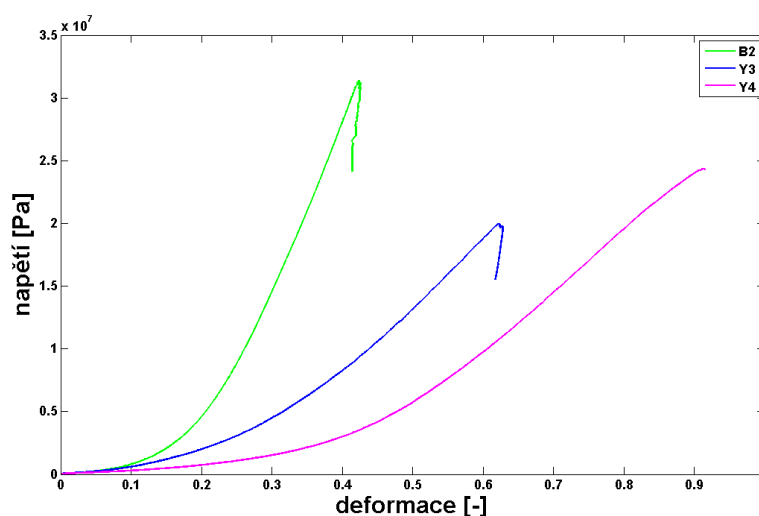
Obrázek 3.17: Geometrie vzorku kůže [1]

Průměrná tloušťka perforovaných vzorků byla 1,36 mm, neperforovaných 1,42 mm. Celkem 18 vzorků podstoupilo zkoušku tahem až do porušení při rychlosti zatěžování $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (obr. 3.18). Další sada vzorků byla testována cyklickým zatěžováním. Vzorky byly zatěžovány do hodnoty nominální deformace 0,18. Tato hodnota deformace byla konstantní po následujících 60 s, poté došlo k odlehčení stejnou rychlostí jako k zatížení - $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ze všech naměřených zkoušek byly vyhodnoceny tři závislosti

napětí-deformace jako referenční - B2 pro vzorek s největší tuhostí, Y3 pro vzorek s průměrnou tuhostí a Y4 pro vzorek s nejnižší tuhostí [1]. Tyto závislosti jsou předmětem obr. 3.19.



Obrázek 3.18: Vzorek na začátku zkoušky (vlevo) a po porušení (vpravo) [1]

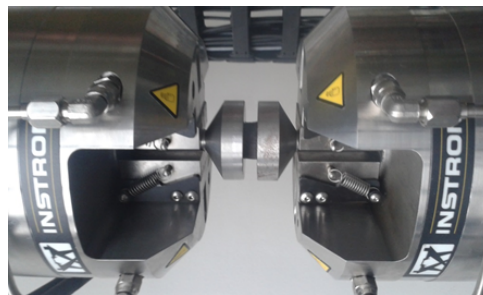


Obrázek 3.19: Referenční závislosti napětí-deformace pro vzorky kůže [1]

3.4.4 Tlaková zkouška pěnové části

Vzorky pro tlakovou zkoušku pěnové části chrániče byly válcového tvaru o výšce 9,4 mm a poloměru 14 mm (obr. 3.20). Zatěžování probíhalo na měřícím zařízení INSTRON 8850 do nominální deformace 0,8, dále následovala relaxace po dobu 60 s a následně odlehčení (obr. 3.21 až 3.23). Zkouška proběhla pro rychlost zatížení $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Referenčními rychlostmi pro

následnou identifikaci materiálových parametrů pomocí MKP modelu byly zvoleny rychlosti zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rychlost deformace $0,0017 \text{ s}^{-1}$), $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0,11 \text{ s}^{-1}$) a $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1,06 \text{ s}^{-1}$). Jejich závislosti síly na čase jsou znázorněny na obr. 3.24 až 3.27.



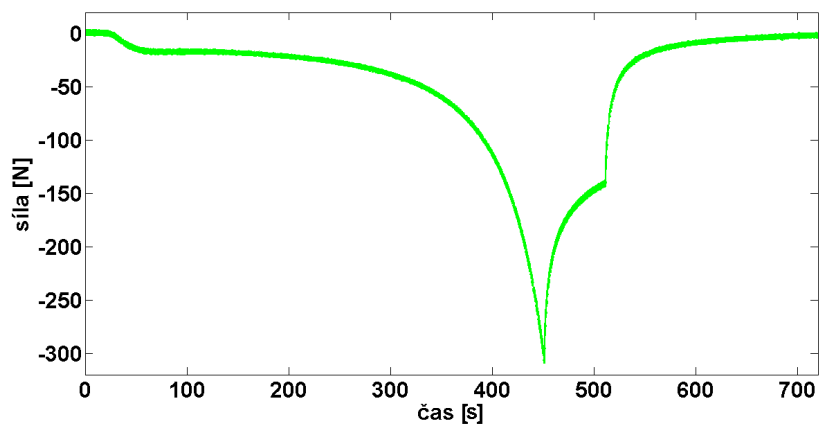
Obrázek 3.20: Vzorek pro tlakovou zkoušku

Obrázek 3.21: Vzorek před zatížením

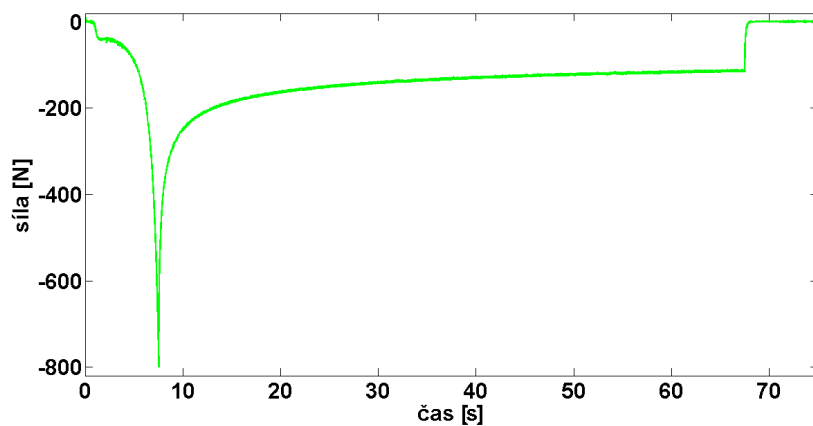
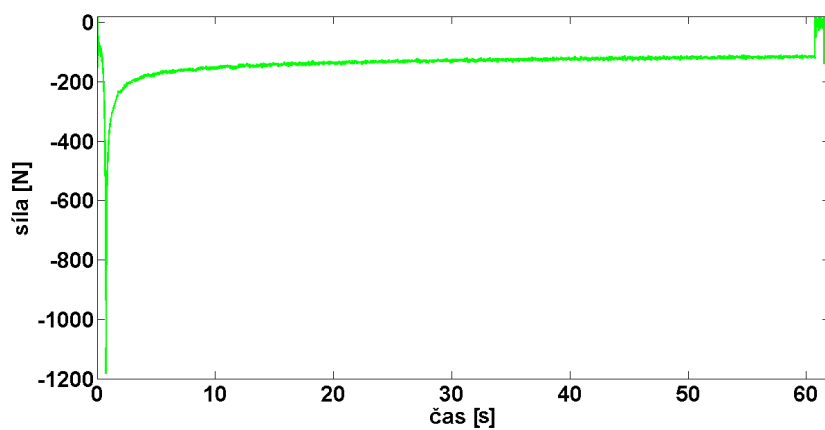
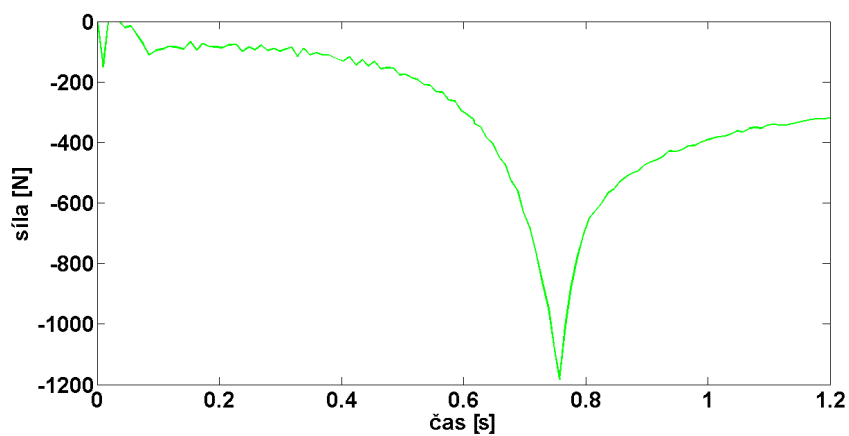


Obrázek 3.22: Vzorek ve fázi relaxace

Obrázek 3.23: Vzorek po odlehčení

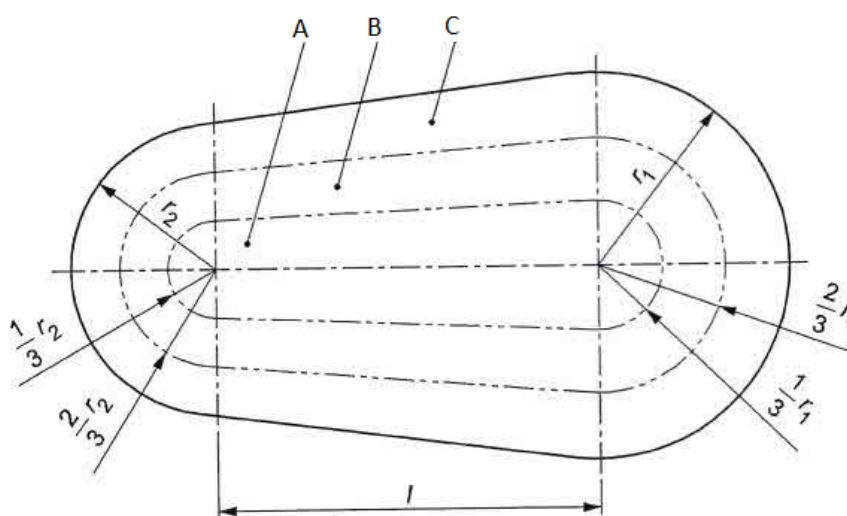


Obrázek 3.24: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Obrázek 3.25: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Obrázek 3.26: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Obrázek 3.27: Detail závislosti síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

3.5 Nárazová zkouška dle normy ČSN EN 1621-1

Veškeré chrániče kloubů pro motocyklisty musí splňovat normu ČSN EN 1621-1 [8]. Ohledně tlumení nárazu rozeznává tato norma dvě třídy provedení. Minimální požadovanou úroveň bezpečnosti se zabývá třída provedení 1. Jízdnímu stylu, který řidiče vystavuje zvýšenému riziku, odpovídá třída provedení 2. Pro třídu provedení 1 musí přenesená síla při nárazu na zkušební oblast A být menší než 35 kN a při nárazu na oblasti B a C menší než 50 kN. Průměrná hodnota z těchto tří oblastí nesmí přesáhnout 35 kN. Pro třídu 2 je pro oblast A určena hraniční hodnota 20 kN a pro oblasti B a C 30 kN, průměrná hodnota musí být nižší než 20 kN. Zkušební oblasti jsou vyznačeny na obr. 3.28. Větší bezpečnost u třídy 2 může být na úkor pohodlí motocyklisty či hmotnosti ochranného prvku. Vytvoření prasklin či úlomků během zkoušky je přípustné, zkušební vzorek se však nesmí rozpadnout či na něm vzniknout ostré okraje [8].



Obrázek 3.28: Zkušební oblasti [8]

Rozměry r_1 , r_2 a l pro chrániče typu A (pro řidiče menší postavy) i typu B (pro řidiče větší postavy) jsou popsány v tab. 3.1.

Tabulka 3.1: Rozměry pro zkušební oblasti

	r_1	r_2	l
typ A	55	32	64
typ B	70	40	80

Zařízení pro nárazovou zkoušku se dle normy skládá z padacího zařízení, které musí umožnit uvolnění padacího razníku, který dopadne na zkušební vzorek energií 50 J (přípustná odchylka 2 J). Padací razník má hmotnost $(5\,000 \pm 10)$ g. Čelní plocha razníku má odpovídat rozměrům 40 x 80 mm, s poloměrem zaoblení $(5 \pm 0,5)$ mm. Podmínky stanovené normou tak odpovídají razníku o hmotnosti 5 000 g, jenž padá na zkušební vzorek z výšky 1 m. Nárazová podložka, na níž je vzorek umístěn, je stejně jako razník vyrobena z leštěné oceli. Její povrch je polokulovitý s poloměrem 50 mm. Celková výška podložky je (180 ± 20) mm. Podložka je k základně o hmotnosti minimálně 500 kg připevněna přes silový snímač. Upevnění podložky k základně musí být takové, aby při nárazových zkouškách celková síla mezi podložkou a pevnou základnou procházela silovým snímačem [8]. Na základě výše zmíněného byl připraven v konečněprvkovém softwaru Abaqus výpočtový model tvořen 4 částmi – padacím razníkem, nárazovou podložkou, základnou a vzorkem příslušného chrániče.

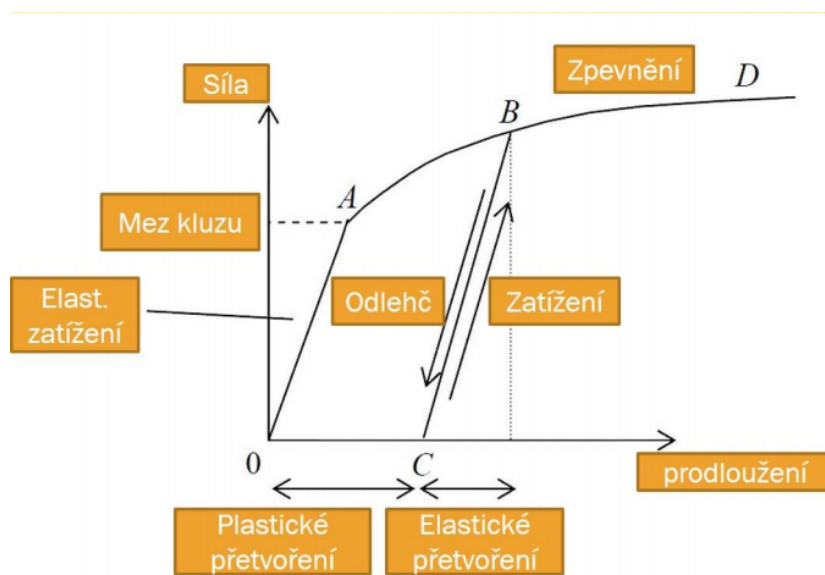
Kapitola 4

Materiálové modely

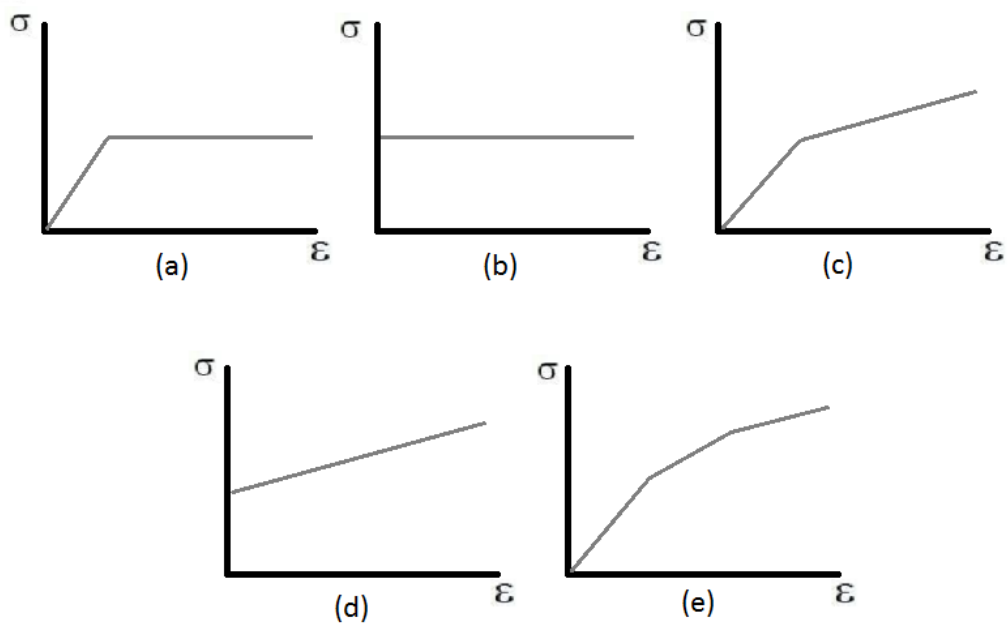
4.1 Elastoplastický model

Základní lineárně elastický materiálový model uvažuje pouze elastické, čili vratné deformace. Závislost mezi napětím a deformací (ekvivalentně mezi silou a prodloužením) je lineární a je stejná při zatížení i odlehčení. Elastoplastický model již uvažuje i stavy, kdy dojde k zatížení nad mezní hodnoty napětí (mez kluzu) a vytvoří se deformace nevratná, čili plastická. Celková deformace pro elastoplastický model je definována jako součet deformace elastické a plastické. Závislost mezi napětím a deformací již není lineární. Při odlehčení z plastického stavu a opětovném zatížení bude materiálová odezva lineární až do dosažení maximálního napětí minulého zatěžovacího cyklu a nelineární až za tímto bodem. Tím dochází ke vzniku nové meze kluzu a jevu zvanému zpevnění materiálu (obr. 4.1) [14].

Existují čtyři základní modely pro popis elastoplasticity. Pružně-plastický model, viz obr. 4.2 (a) je vhodné použít pro modelování tažení, válcování za tepla či v dalších případech tváření materiálů. Při předpokladu velkých plastických deformací je možné elastické deformace zanedbat a použít tuho-plastický model (obr. 4.2 (b)). V dalších případech je možné použít modely s lineárním zpevněním, ať již pružně-plastický model s lineárním zpevněním (obr. 4.2 (c)) či v případě zanedbání elastické deformace tuho-plastický model s lineárním zpevněním (obr. 4.2 (d)). Pro větší přesnost je možné pružně-plastický model s lineárním zpevněním modifikovat a aproximovat jej pomocí více lineárních závislostí. (obr.4.2 (e)).



Obrázek 4.1: Celková deformace (přetvoření) pro elastoplastický model [14]



Obrázek 4.2: Základní elastoplastické modely

4.2 Hyperelastický model

Obecný hyperelastický model je nelineárně elastický model definovaný pomocí hustoty deformační energie. Mezi základní hyperelastické modely patří Ogdenův a polynomiální (Mooney-Rivlinův) model. Pro Ogdenův model je hustota deformační energie definována jako [6]:

$$W = \sum_{k=1}^n \frac{\mu_k}{\alpha_k} (\lambda_1^{\alpha_k} + \lambda_2^{\alpha_k} + \lambda_3^{\alpha_k} - 3), \quad (4.2.1)$$

kde λ_1, λ_2 a λ_3 jsou poměrná prodloužení ve směru hlavních os a n , μ_k a α_k jsou materiálové parametry.

Pro nestlačitelný Mooney-Rivlinův model je hustota deformační energie určena vztahem [6]:

$$W = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j, C_{00} = 0, \quad (4.2.2)$$

kde I_1 a I_2 jsou první, resp. druhý deformační invariant a C_{ij} jsou materiálové konstanty.

Je-li pro Mooney-Rivlinův model uvažována stlačitelnost, je hustota deformační energie definována vztahem [6]:

$$W = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^m D_k (J - 1)^{2k}, C_{00} = 0, \quad (4.2.3)$$

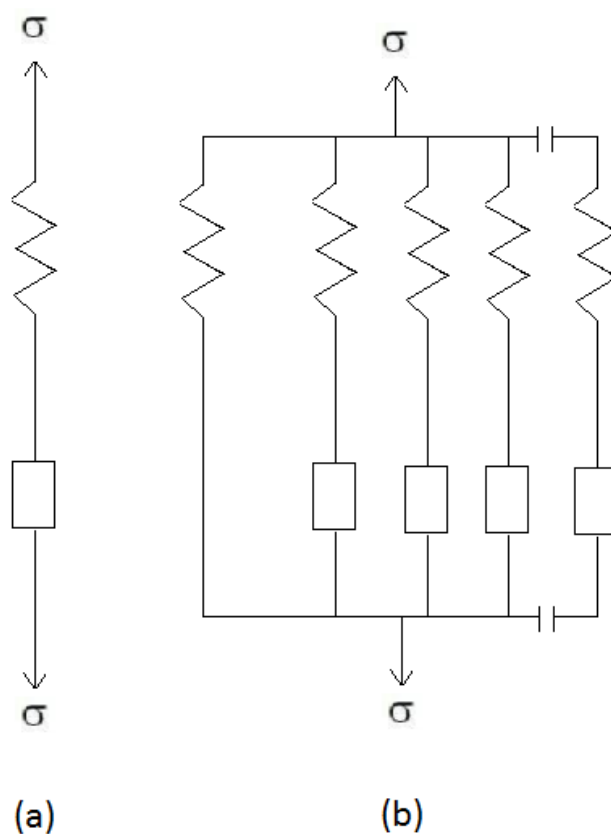
kde C_{ij} a D_k jsou materiálové konstanty, v případě D_k vyjadřující stlačitelnost a \bar{I}_1 a \bar{I}_2 jsou přepočtené invarianty hlavních deformací určené jako:

$$\bar{I}_1 = J^{-2/3} I_1, \bar{I}_2 = J^{-4/3} I_2, \quad (4.2.4)$$

kde J vyjadřuje poměr mezi deformovaným a výchozím objemem.

4.3 Viskoelastický model

Chování viskoelastického materiálu je závislé na rychlosti zatěžování, při jeho modelování tak nelze vystačit pouze s hyperelastickým materiálovým modelem, jenž je časově nezávislý. Obecný viskoelastický materiálový model se skládá z pružin a tlumičů. Pružiny mohou být lineárně i nelineárně elastické. Napětí na tlumiči je závislé na rychlosti deformace, čímž je postihnuta již zmíněná závislost na rychlosti zatěžování [2]. Mezi základní viskoelastické materiálové modely patří Maxwellův model, který se skládá z jedné pružiny a jednoho tlumiče v sérii, jeho schéma je předmětem obr. 4.3 (a). Vhodným modelem pro pěnové materiály jsou Pronyho řady. Tento model se skládá z $n + 1$ větví, z nichž n jsou paralelně složené Maxwellovy modely a poslední větev obsahuje samotnou pružinu (obr. 4.3 (b)) [6].



Obrázek 4.3: Schéma Maxwellova modelu (vlevo) a Pronyho řad

Při kombinaci Mooney-Rivlinova modelu s Pronyho řadou vznikne vztah [6]:

$$\mathbf{S} = \int_0^t \mathbf{K}(t - \tau) \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{E}} d\tau, \quad (4.3.1)$$

kde \mathbf{S} je 2. Piola-Kirchhoffův tenzor napětí, \mathbf{E} je Green-Lagrangeův tenzor deformace, t je čas, τ je integrační konstanta, W je hustota deformační energie pro Mooney-Rivlinův hyperelastický model a K je relaxační modul pro Pronyho řadu určený vztahem [6]:

$$K(t) = K_\infty + \sum_{i=1}^n K_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (4.3.2)$$

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

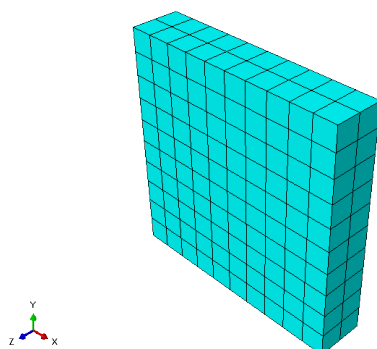
Kapitola 5

Identifikace materiálových parametrů

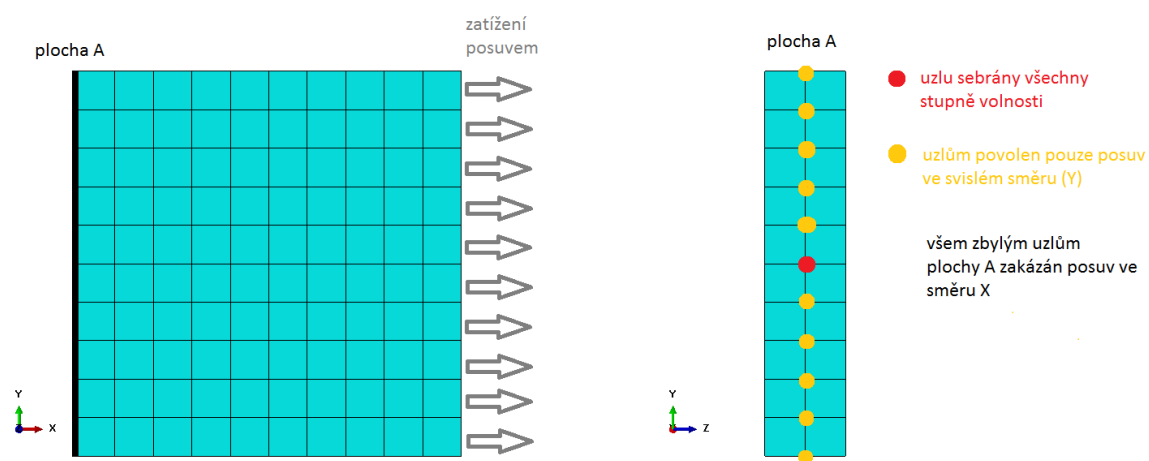
5.1 Parametry pro chránič PSÍ

5.1.1 Výpočtový model tahové zkoušky plastové části

V MKP softwaru Abaqus byl vytvořen model tahové zkoušky, s jehož pomocí byly srovnáním s naměřenými daty vyhodnoceny materiálové parametry pro elastoplastický materiálový model plastu použitého v chrániči. Modelována byla pouze část mezi rameny extenzometru. Vzhledem k velké tloušťce vzorku vůči šířce a délce modelované části byla diskretizace modelu provedena lineárními trojrozměrnými prvky typu C3D8 o velikosti 1 mm (obr. 5.1). Materiál byl uvažován homogenní izotropní, jeho lineárně elastická část byla popsána Youngovým modulem pružnosti, jehož zjištění bylo cílem této dílčí práce a Poissonovo číslem, které je pro plastové materiály 0,4. Na jedné straně geometrie byla na celé ploše průřezu definována okrajová podmínka posuvu ve směru X reprezentující zatížení tahem během experimentální zkoušky. Na opačné straně modelované geometrie byl celé ploše průřezu zakázán pohyb ve směru X. Uzlům uprostřed průřezu po celé jeho délce pak zakázán pohyb ve všech směrech kromě směru Y a uzlu ve středu této hrany byly odebrány všechny stupně volnosti (obr. 5.2). Tyto tři okrajové podmínky reprezentují pohyb části vzorku mezi rameny extenzometru.

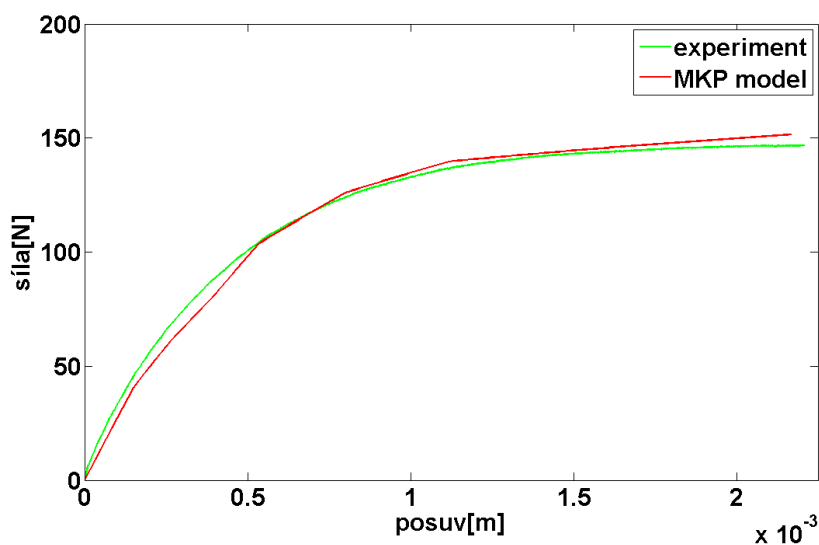


Obrázek 5.1: Konečnoprvková síť modelu pro tahovou zkoušku



Obrázek 5.2: Definice okrajových podmínek pro tahovou zkoušku

Jelikož se nejednalo o cyklický děj, bylo v modelu uvažováno izotropní zpevnění. Byl použit pružně-plastický model s lineárním zpevněním aproximovaný pomocí více lineárních závislostí, které byly zadány hodnotami napětí a jimi odpovídajícími hodnotami plastických deformací. Z modelu byla vyhodnocena závislost síly na posuvu, která byla porovnávána s typickou závislostí získanou z experimentu. Shody s experimentem znázorněné na obr. 5.3 bylo dosaženo pro parametry uvedené v tab. 5.1 a hodnotu Youngova modulu 131,53 MPa.



Obrázek 5.3: Porovnání modelu s experimentem pro tahovou zkoušku plastu

Tabulka 5.1: Parametry elastoplastického modelu pro tahovou zkoušku

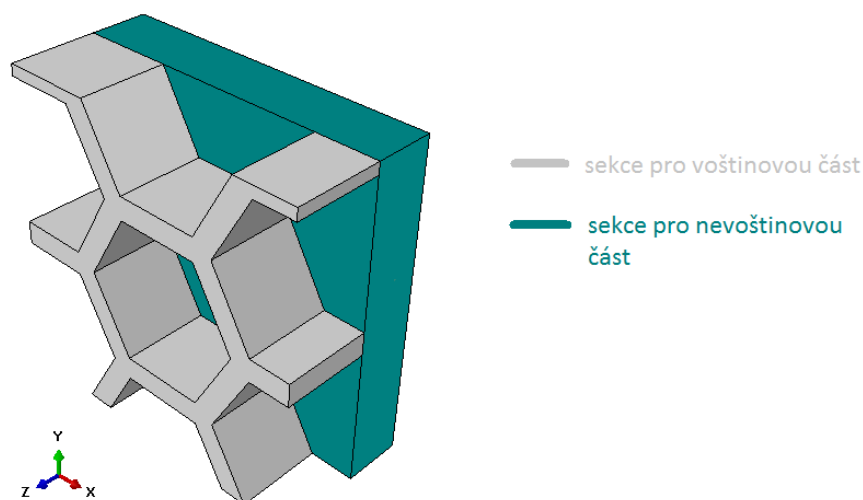
Napětí [MPa]	Plastická deformace [-]
2,0	0
3,0	0,0035
4,0	0,0085
5,2	0,0125
6,5	0,0280
7,4	0,0500
10,0	0,2000

5.1.2 Výpočtový model tlakové zkoušky plastové části

Jelikož byl vzorek popsán v kapitole 3.4.2 symetrický podle dvou rovin, čili se skládal ze čtyř stejných čtvrtin, bylo možné zjednodušit výpočtový model tlakové zkoušky a uvažovat v něm pouze čtvrtinu vzorku, což také výrazně snížilo výpočetní náročnost modelu. Jako vstupní materiálové parametry pro elastoplastický model byly zvoleny výsledné hodnoty identifikované pomocí výpočtového modelu tahové zkoušky.

Jak je patrné z obr. 3.14, během tlakové zkoušky dochází k postupnému porušování struktury plastu, což má za následek degradaci tuhosti na nevoštinové části vzorku. Tato skutečnost byla v modelu postihnuta tak, že byl vzorek, resp. jeho modelovaná symetrická

čtvrtina rozdělena na dvě sekce, kde každé byly přiřazeny rozdílné materiálové parametry (obr. 5.4). Voštinové části byly definovány vyšší hodnoty Youngova modulu pružnosti a napětí pro elastoplastický model než nevoštinové. Tento přístup byl zvolen proto, že modelování porušování a prasklin pro tak složitou geometrii, kterým vzorek byl, by bylo příliš náročné a nezaručovalo by přesnější výsledky.



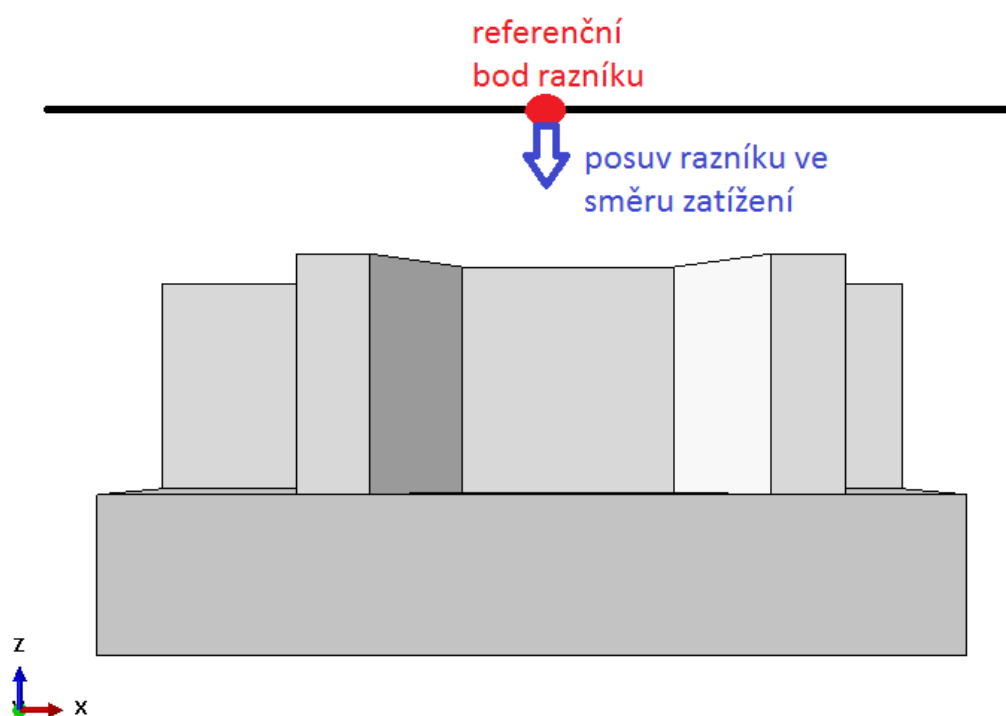
Obrázek 5.4: Rozdělení geometrie na dvě sekce

Elastoplastický materiálový model byl použit lineární pružně-plastický, stejně jako v případě tahové zkoušky. Pro snížení výpočtové náročnosti byl razník stlačující vzorek během tlakové zkoušky modelován jako analyticky tuhé těleso, jež bylo definováno pouze pomocí geometrie, hmotnosti a referenčního bodu, jemuž bylo možné předepsat okrajové podmínky. Odpadla tak nutnost razník diskretizovat pomocí konečných prvků. Vzhledem k tomu, že i tlaková zkouška byla děj jednorázový, nikoliv cyklický, bylo v modelu uvažováno izotropní zpevnění. Na obr. 5.5 jsou znázorněny okrajové podmínky geometrie vzorku. Na modře zvýrazněné ploše vzorek ležel na nehybné čelisti během experimentu. Byla jí proto odebrána možnost pohybu ve směru zatížení. Žlutě a červeně zvýrazněné plochy leží v rovinách, podle nichž, kdybychom zrcadlili celou geometrii, získali bychom celý vzorek. Těmito plochám byly odebrány stupně volnosti tak, aby byla zachována symetrie i pro deformovaný vzorek.



Obrázek 5.5: Definice okrajových podmínek pro tlakovou zkoušku

Referenčnímu bodu razníku byl definován posuv rychlostí $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (obr. 5.6). Mezi razníkem a vzorkem byl definován kontakt, stejně tak i mezi jednotlivými plochami vzorku, neboť i ty přišly během tlakové zkoušky do kontaktu.

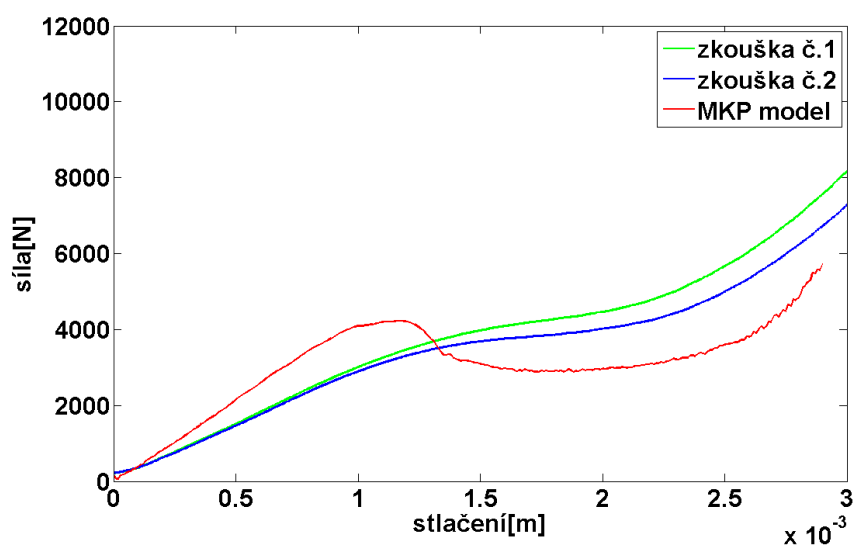


Obrázek 5.6: Definice posuvu razníku pro tlakovou zkoušku

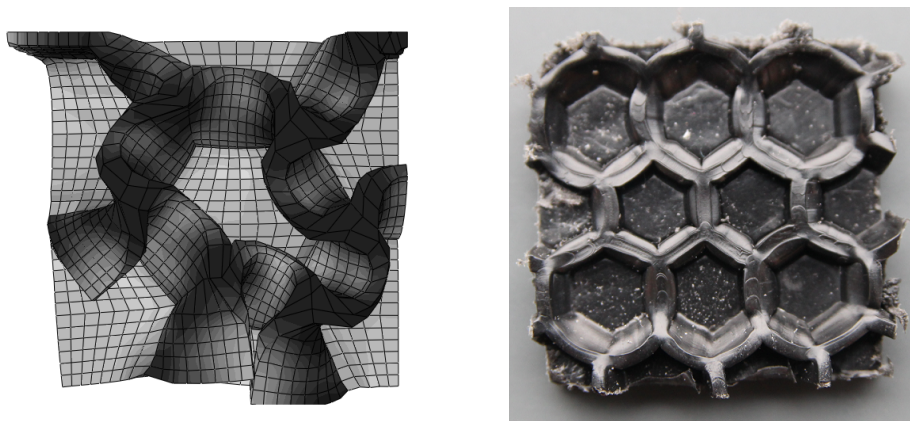
Pro hodnoty Youngova modulu a parametrů elastoplastického modelu obou sekcí uvedené v tab. 5.2 bylo dosaženo přiblížení se výstupům z experimentu do velikosti posuvu 3 mm (obr. 5.7). Na obr. 5.8 je porovnání vizualizace modelu a defromovaného skutečného vzorku.

Tabulka 5.2: Youngův modul a parametry elastoplastického modelu pro tlakovou zkoušku

sekce pro voštinovou část		sekce pro nevoštinovou část	
E	180 MPa	E	55 MPa
napětí [MPa]	plastická deformace [-]	napětí [MPa]	plastická deformace [-]
27,50	0	25,00	0
28,60	0,0052	26,00	0,0052
29,04	0,0065	26,40	0,0065
29,48	0,0082	26,80	0,0082
30,09	0,0130	27,36	0,0130
31,00	0,0195	28,15	0,0195
31,48	0,0280	28,60	0,0280
31,90	0,0420	29,00	0,0420



Obrázek 5.7: Porovnání závislostí síla-stlačení pro oba experimenty a MKP model



Obrázek 5.8: Vizualizace pro model tlakové zkoušky (vlevo) v porovnání s deformovaným skutečným vzorkem (vpravo)

5.1.3 Výpočtový model tahové zkoušky kožené části

Pro identifikaci materiálových parametrů vzorků z kůže byl použit Ogdenův model popsáný vztahem 5.3 pro $n=1$. Následnou optimalizací, provedenou metodou nejmenších čtverců, kde cílová funkce byla [1]:

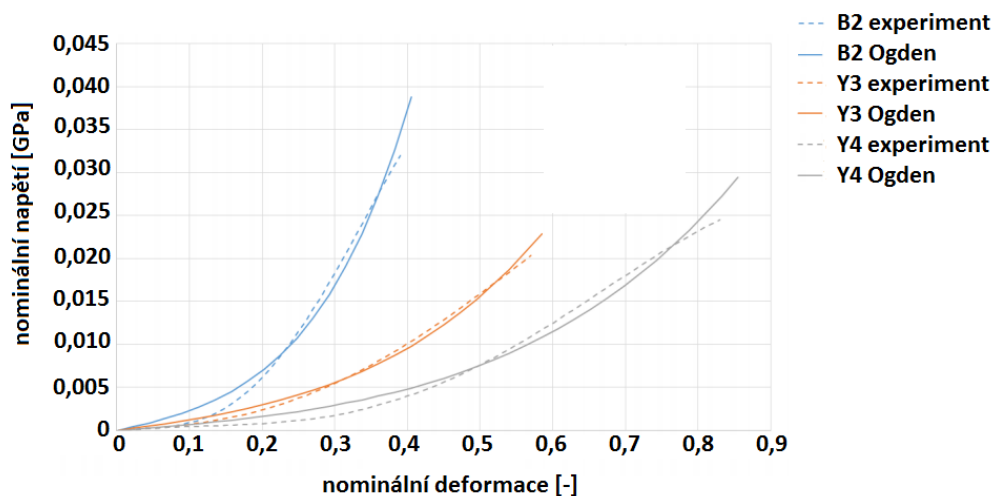
$$\phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\sigma_i^{test} - \sigma_i)^2, \quad (5.1.1)$$

kde σ_i^{test} představuje naměřená nominální napětí, σ_i je napětí získané z funkcionálu hustoty deformační energie W a n je počet aproximačních bodů, byly vyšetřeny parametry Ogdenova modelu μ a α pro všechny tři referenční zkoušky, viz 5.3:

Tabulka 5.3: Identifikované parametry Ogdenova modelu pro vzorky kůže [1]

	B2	Y3	Y4
$\mu [MPa]$	6,004	3,775	2,164
$\alpha [-]$	11,690	7,910	7,328

Těmto parametrům odpovídá porovnání závislostí napětí-deformace pro experimenty a modely, jež je znázorněno na obr. 5.9.



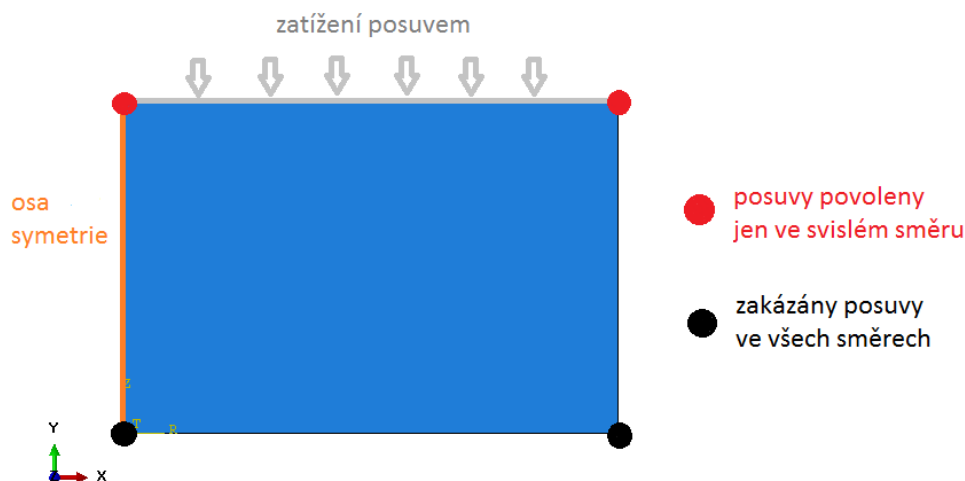
Obrázek 5.9: Porovnání závislostí napětí-deformace pro experimenty a MKP modely vzorků kůže [1]

Pro nárazové zkoušky dle normy ČSN EN 1621-1 bylo pracováno s hodnotami pro vzorky s průměrnou tuhostí, tedy Y3.

5.1.4 Výpočtový model tlakové zkoušky pěnové části

Vzhledem k tomu, že testované vzorky pěnové části chrániče PSÍ byly válcového tvaru, byl v softwaru Abaqus jako reprezentace těchto vzorků sestaven axisymetrický model. Aby byla zajištěna konvergence úlohy pro tak velké deformace, na které byl vzorek stlačen během experimentu ($\varepsilon = 0,8$), byla geometrie diskretizována pouze jedním elementem. S přihlédnutím k charakteru úlohy byl model řešen explicitním řešičem.

Zatížení vzorku je v modelu definováno posuvem jeho horní hrany, která u axisymetrického modelu odpovídá ploše, na kterou působí pohybující se čelist měřícího zařízení. Předepsaný posuv odpovídá rychlosti zatěžování. Horním uzlům elementu je dovolen pouze posuv ve směru zatížení, ostatní stupně volnosti byly odebrány. Spodní hraně, jež reprezentuje plochu, která byla během experimentu na nehybné čelisti, byly odebrány všechny stupně volnosti. Deformace vzorku do směru kolmého na směr zatěžování byla zamezena symetrií na vnitřní hraně a okrajovou podmínkou na vnější hraně, neboť deformace v tomto směru byla zanedbatelná. Popis okrajových podmínek modelu je předmětem obr. 5.10.



Obrázek 5.10: Popis axisymetrického modelu tlakové zkoušky

Vzhledem k závislosti napětí na deformaci z experimentu (obr. 3.24 až 3.27) byl jako materiálový model zvolena kombinace Mooney-Rivlinova (polynomiálního) hyperelastického modelu, jímž je možné dobře popisovat velké deformace (u tlaku až 100%) a viskoelastického modelu popsání pomocí Pronyho řad. Hyperelastický popis chování pružiny zajišťuje lepší shodu s experimentem, než by tomu bylo v případě použití lineárního elastického popisu.

Z důvodu širokého rozsahu parametrů pro polynomiální model a Pronyho řady bylo při identifikaci materiálových parametrů pro pěnovou část chrániče PSÍ přistoupeno k optimalizaci v SW OptiSlang. Té předcházelo určení vstupních parametrů optimalizace pro polynomiální model pomocí vztahů:

$$C_{10} + C_{01} = \frac{E}{6}, \quad (5.1.2)$$

$$D_1 = \frac{1 - 2\nu}{C_{10} + C_{01}}, \quad (5.1.3)$$

kde E představuje Youngův modul pružnosti a ν Poissonovo číslo.

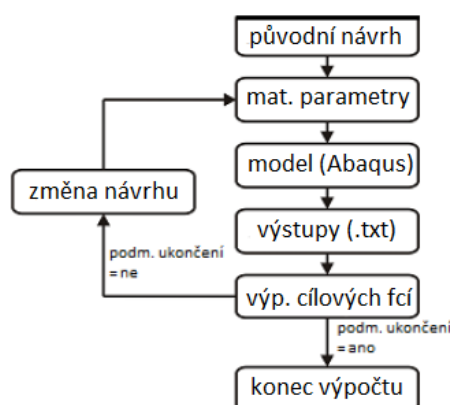
Poissonovo číslo bylo stanoveno jako 0,2. Vstupní hodnota Youngova modulu pružnosti byla určena ze směrnice grafu napětí-deformace odpovídajícímu závislosti síla-čas z obr. 3.27. Na základě tohoto byla získána hodnota $E = 42\,738\text{ Pa}$. Dosazením do vztahů 5.1.4 a 5.1.5 byl určen součet parametrů C_{01} a C_{10} a hodnota parametru D_1 :

$$C_{10} + C_{01} = \frac{42738}{6} = 7123 \text{ Pa}, \quad (5.1.4)$$

$$D_1 = \frac{1 - 0,4}{7123} = 8,4 \text{ e-5}, \quad (5.1.5)$$

Při použití polynomiálního hyperelastického modelu prvního řádu a Pronyho řad se třemi větvemi bylo dosaženo dobré shody s experimenty pro rychlosti zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ovšem pro rychlost $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ vykazoval model v porovnání s experimentem velké odchylky především ve fázi zatěžování, proto bylo přistoupeno k použití polynomiálního modelu druhého řádu a modelu Pronyho řad se dvěma větvemi. Důraz byl kladen především na shodu v maximálních hodnotách sil.

Celý proces optimalizace je zachycen ve formě vývojového diagramu na obr. 5.11. Optimalizovány byly naráz výpočtové modely pro všechny tři referenční rychlosti zatěžování.



Obrázek 5.11: Vývojový diagram optimalizačního procesu

Objektivní funkce byla definována jako:

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i^{model} - F_i^{exp}}{F_i^{exp}} \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_j^{model} - F_j^{exp}}{F_j^{exp}} \right)^2 + \sum_{k=1}^n \left(\frac{F_k^{model} - F_k^{exp}}{F_k^{exp}} \right)^2, \quad (5.1.6)$$

kde F_i^{exp} , F_j^{exp} a F_k^{exp} jsou hodnoty sil z referenčních zkoušek ve zvolených časových okamžicích, jejichž počet odpovídá n . Zvolených časových okamžiků bylo pro všechny tři zkoušky osm, šest ve fázi zatěžování, jeden v průběhu relaxace a jeden na jejím konci. F_i^{model} , F_j^{model} a F_k^{model} jsou hodnoty sil z modelu, odpovídající zvoleným časovým okamžikům. Každá z dílčích sum odpovídá dílčí cílové funkci pro jednotlivé rychlosti zatěžování. Vzhledem k počtu zvolených časových okamžiků lze považovat aproximaci za dostatečnou.

K minimalizaci cílové funkce byl vybrán evoluční algoritmus. Ten je založen na principech evolučních procesů a teorie přežití nejschopnějších jedinců. Pracuje s celou populací řešení, kterou se snaží dále zlepšovat kombinováním vhodných řešení předchozí generace [13]. V průběhu hledání materiálových parametrů popisujících vhodné chování pěnových vzorků pro všechny tři referenční rychlosti zatěžování byl kromě již zmíněné změny kombinace materiálových modelů několikrát měněn i rozsah parametrů. Po několika optimalizacích byly rozsahy materiálových parametrů ustáleny na hodnotách, které popisuje tab. 5.4. Nastavení evolučního algoritmu je předmětem tab. 5.5.

Tabulka 5.4: Rozsahy materiálových parametrů pro optimalizaci

parametr	minimum	maximum
C_{01} [Pa]	2000	5000
C_{10} [Pa]	4000	10000
C_{20} [Pa]	500	1500
g_1 [-]	0,60	0,90
τ_1 [s]	0,5	30,0
D_1 [Pa ⁻¹]	4e-5	1e-4
D_2 [Pa ⁻¹]	4e-5	1e-4

Parametr g_1 představuje parametr Pronyho řady, τ_1 je relaxační čas.

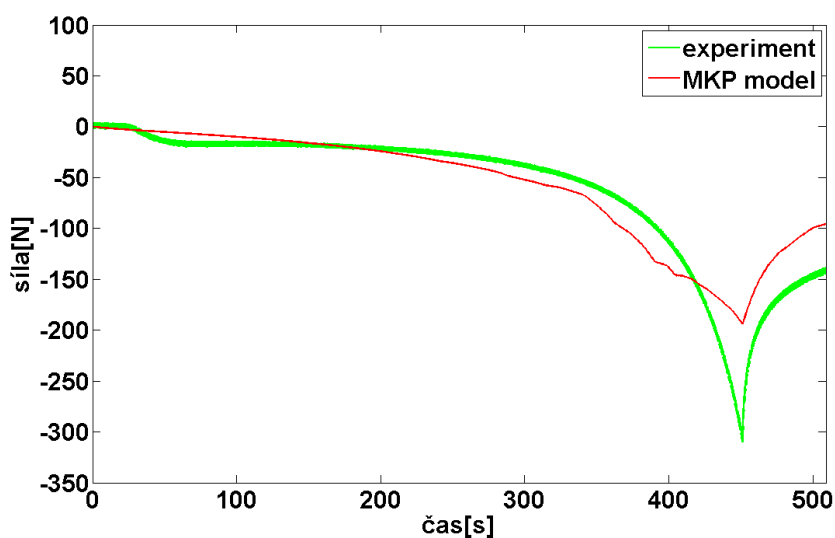
Tabulka 5.5: Nastavení evolučního algoritmu

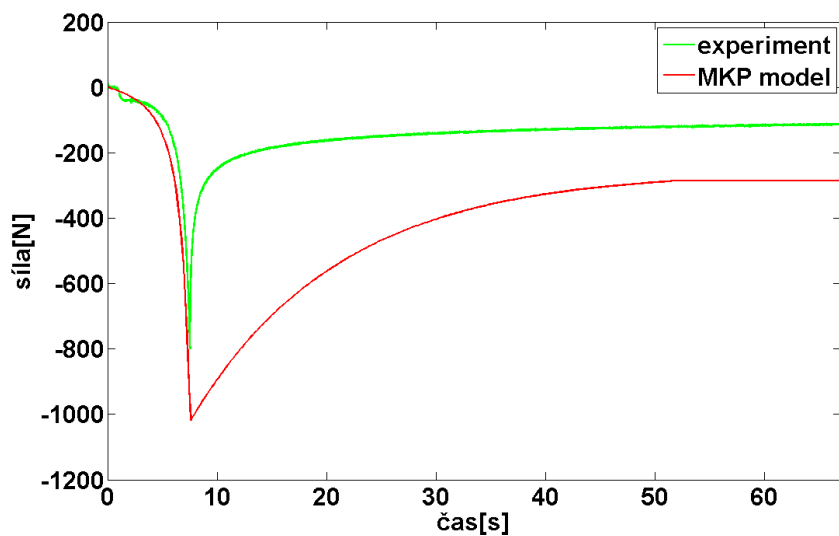
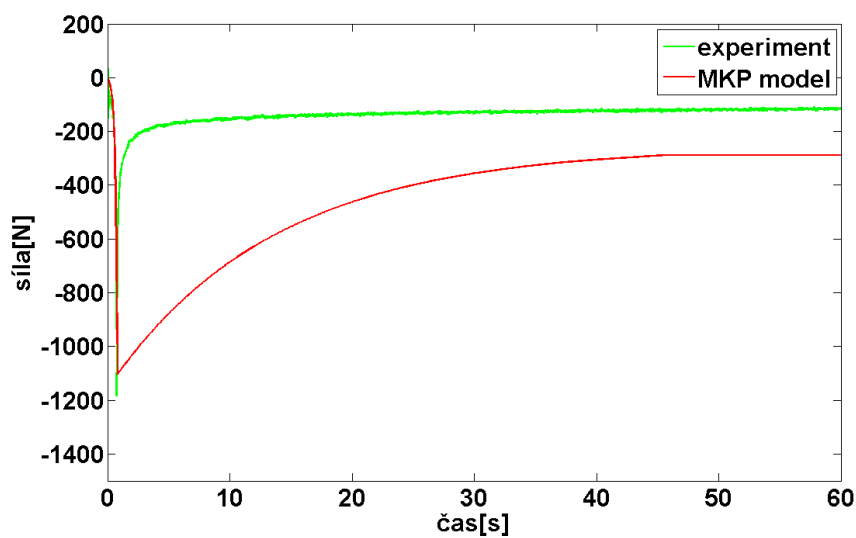
velikost populace	1000
počet generací	100
počet předků	25

Pro zvolenou cílovou funkci byla získána nejlepší shoda modelů s experimenty pro materiálové parametry uvedené v tab. 5.6. Porovnání závislostí síla-čas pro modely a experimenty je vykresleno na obr. 5.12 až 5.14

Tabulka 5.6: Výsledné hodnoty materiálových parametrů pro pěnové vzorky chrániče PSÍ

parametr	hodnota
C_{01} [Pa]	2800
C_{10} [Pa]	6300
C_{20} [Pa]	700
g_1 [-]	0,8
τ_1 [s]	13,5
D_1 [Pa ⁻¹]	5e-5
D_2 [Pa ⁻¹]	5e-5

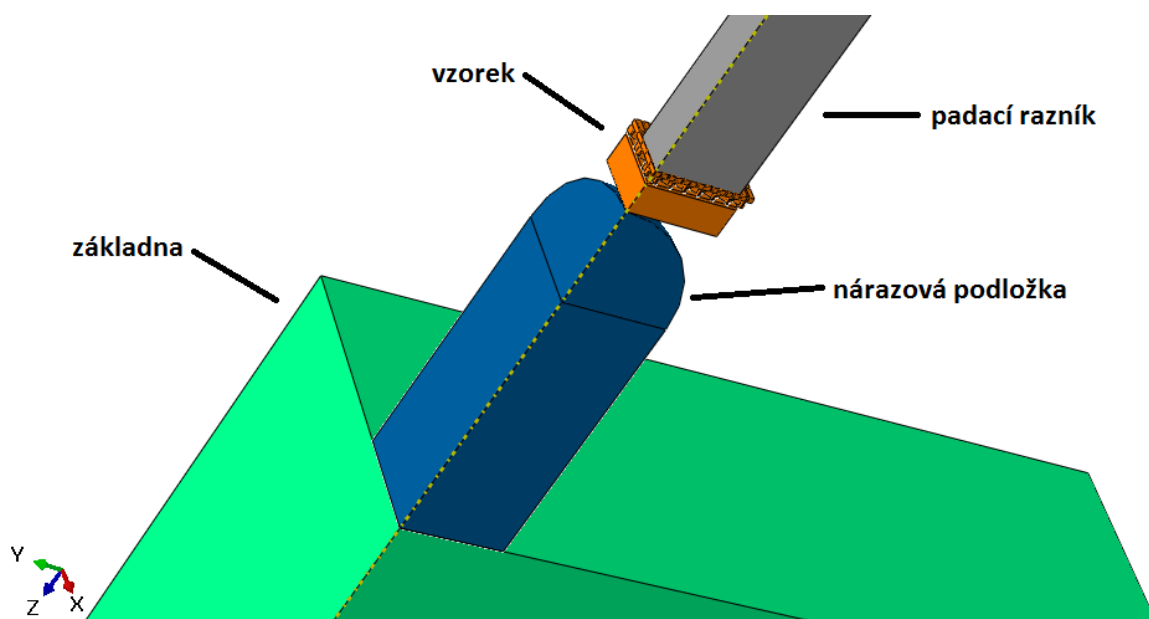
Obrázek 5.12: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování 1 mm · min⁻¹

Obrázek 5.13: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Obrázek 5.14: Závislost síly na čase pro rychlost zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Kapitola 6

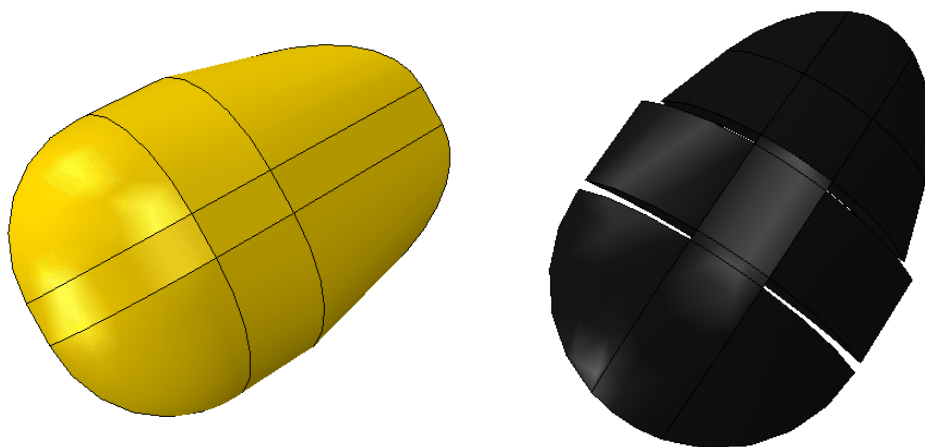
Simulace nárazové zkoušky

Simulace nárazové zkoušky dle normy ČSN EN 1621-1 byla provedena pro kombinovaný chránič PSÍ. Schéma celého zařízení pro nárazovou zkoušku je předmětem obr. 6.1.



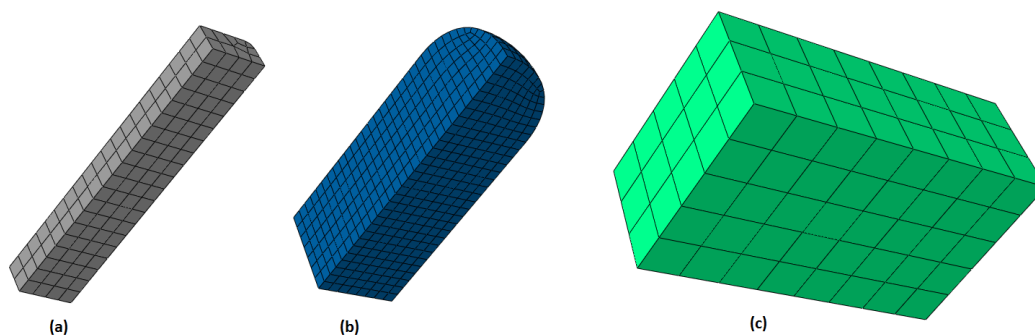
Obrázek 6.1: Schéma zařízení pro nárazovou zkoušku dle normy ČSN EN 1621-1

Simulace pro pěnové chrániče SCL2 a SCL1-42 jsou tématem budoucích prací na KME ZČU, avšak v rámci této práce byly parametricky vytvořeny jejich geometrické modely, viz obr. 6.2, do simulace použitelné.



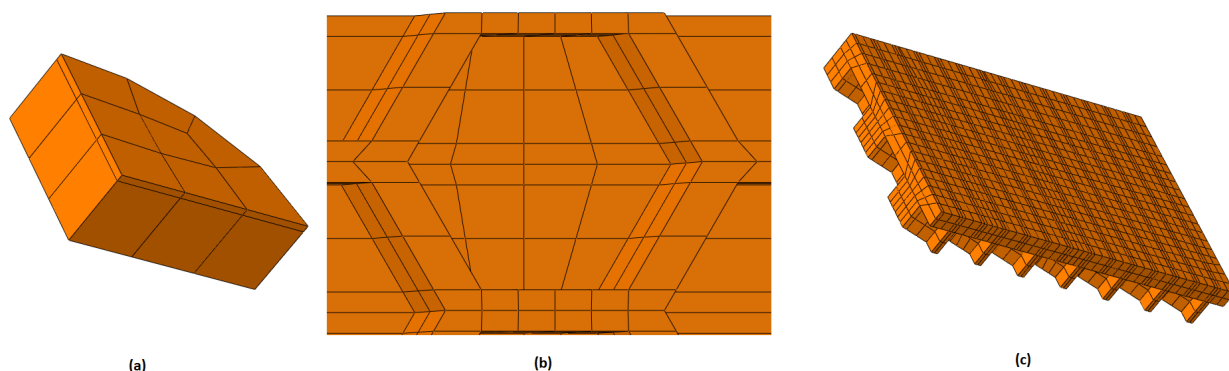
Obrázek 6.2: Geometrické modely chráničů SCL2 (vlevo) a SCL1-42 (vpravo)

Celá úloha pro chránič PSÍ byla zjednodušena na symetrickou čtvrtinu. Padací razník, nárazová podložka a základna mají být dle normy vyrobeny z leštěné oceli, a proto jim byl přiřazen materiál tomu odpovídající o hustotě $7860 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, s Youngovo modulem pružnosti 210 GPa a Poissonovo číslem 0,3. Vzorek sestával ze tří částí - plastu s voštinovou strukturou, kůže a pěny, jejichž materiálové parametry byly určeny v předchozích kapitolách. Geometrie základny není dle normy vymezena, její symetrická čtvrtina použitá v modelu měla tvar kvádrů s rozměry 150 x 424,4 x 250 mm, což odpovídalo požadované hmotnosti (125 kg pro čtvrtinu základny). Padací razník a základna neměly složitou geometrii, proto při jejich diskretizaci mohlo být přistoupeno k hrubší konečnoprvkové síti. Velikost elementu u razníku byla 10 mm, u základny 50 mm. Pro nárazovou podložku byla definována velikost prvku 6 mm, aby bylo dosaženo kulového tvaru (obr. 6.3).



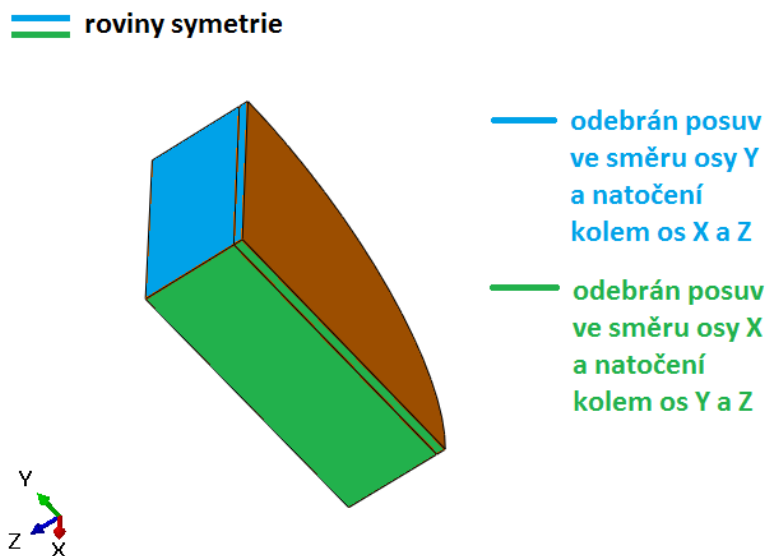
Obrázek 6.3: Konečnoprvková síť pro razník (a), podložku (b) a základnu (c)

Vzhledem ke skutečnosti, že kůže je k pěnové části chrániče přilepena, byla tato modelována jako jedna část modelu, které byly následně přiřazeny dvě sekce s materiálovými parametry pro kůži a pěnu. Pěnová část chrániče byla diskretizována jedním prvkem po tloušťce, opět z důvodu stability výpočtu jako v případě identifikace materiálových parametrů (obr. 6.4). Nejjemnější konečnoprvková síť musela být definována pro plastovou část chrániče z důvodu složitosti geometrie. Byly definovány dva elementy po tloušťce i výšce voštinové buňky, kvůli dopadu razníku na nevoštinový díl plastové části chrániče a velké deformace v této oblasti během celé zkoušky však vzhledem ke stabilitě výpočtu musela být konečnoprvková síť mimo voštinové struktury hrubší a zároveň musela konečnoprvková síť celé plastové části plynule navazovat.



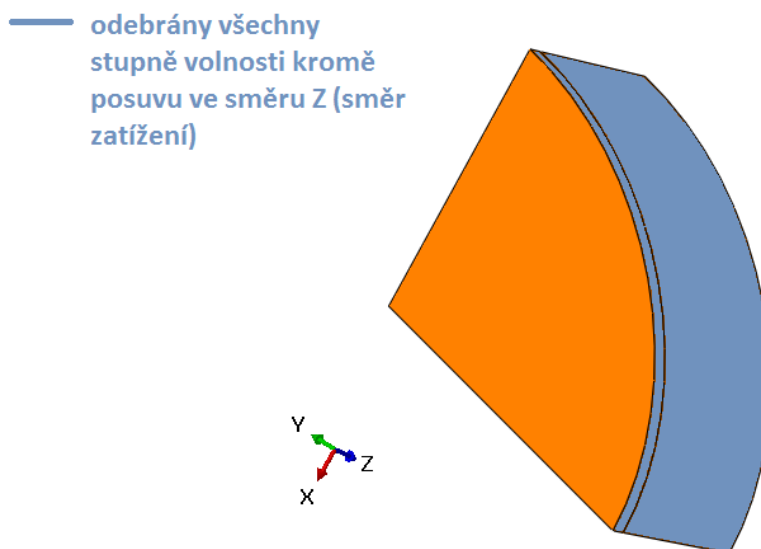
Obrázek 6.4: Konečnoprvková síť pro pěnu a kůži (a) a plastovou část - detail voštinového dílu (b) a nevoštinový díl (c)

Model je definován tak, že na začátku analýzy je padací razník již v kontaktu se vzorkem a je mu přiřazena rychlost vypočítaná dle vztahu 3.2.1 - $4,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Razníku jsou odebrány všechny stupně volnosti kromě směru, ve kterém je definována rychlost. V závislosti na symetrii úlohy jsou všem ostatním částem modelu odebrány příslušné stupně volnosti v rovinách symetrie. V případě razníku to není nutné, neboť je definována již zmíněná okrajová podmínka. Odebrání stupňů volnosti v rovinách symetrie je demonstrováno na pěno-kožené části vzorku, viz (obr. 6.5).



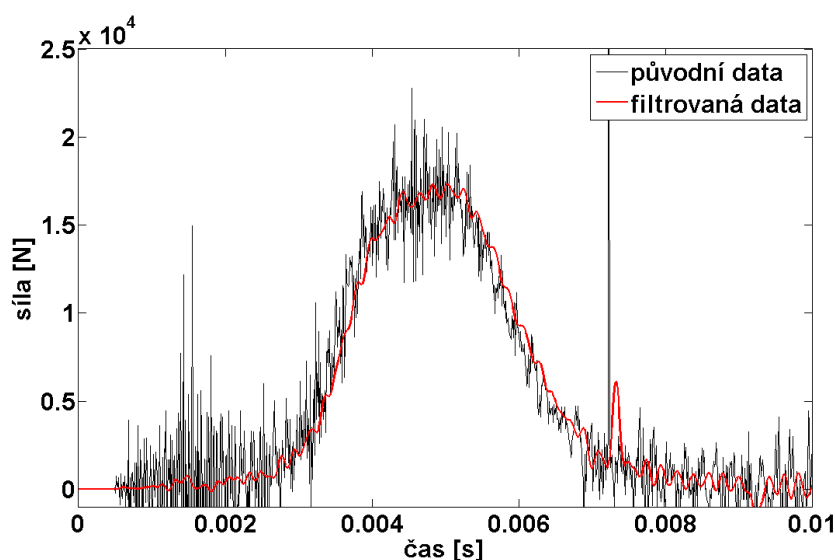
Obrázek 6.5: Popis okrajových podmínek v rovinách symetrie

Na půdorysu nárazové podložky jsou stejně jako v případě razníku odebrány všechny stupně volnosti kromě směru pádu razníku. Stejná okrajová podmínka je definována i po obvodové ploše pěno-kožené části vzorku, zde v korespondenci na model pěnového vzorku v rámci identifikace materiálových parametrů, neboť pěna se v jiných směrech než ve směru zatížení deformuje zanedbatelně (obr. 6.6).



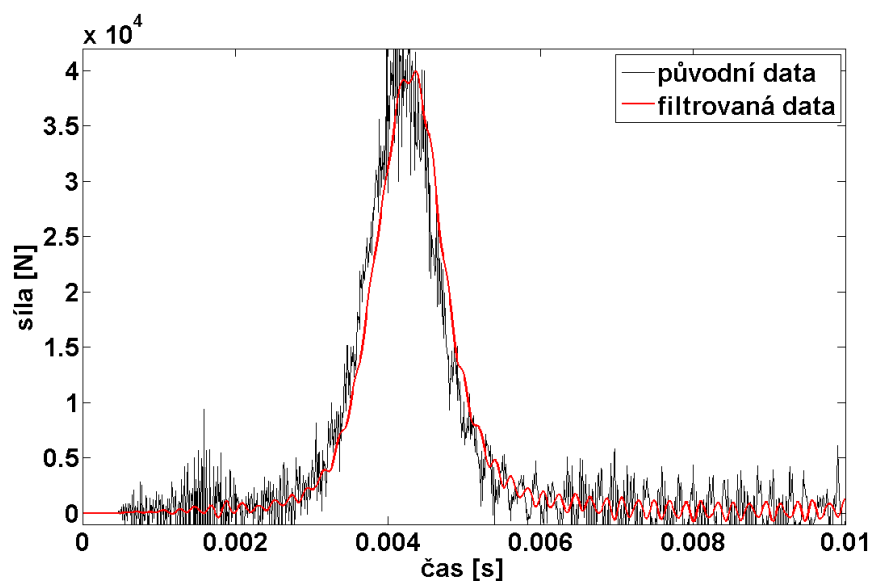
Obrázek 6.6: Okrajová podmínka na pěnové části vzorku

Nastaveny jsou celkem čtyři kontakty. Mezi dopadovou plochou razníku a horní plochou plastové části vzorku, mezi spodní plochou plastové části vzorku a koženou částí vzorku, neboť tyto části chrániče k sobě nejsou pevně připojeny, mezi pěnovou částí vzorku a polokulovitou částí nárazové podložky a mezi rovnou spodní plochou podložky a základnou. V případě kontaktu ocelového razníku s plastovou částí chrániče byl uvažován koeficient tření 0,1. Pro kontakt mezi plastem a kůží byl koeficient tření definován hodnotou 0,4 a pro kontakt mezi pěnou a ocelovou podložkou hodnotou 0,3. Mezi podložkou a základnou tření definováno nebylo. Výstupem modelu je kontaktní síla mezi nárazovou podložkou a základnou, kde se dle normy nachází silový snímač. Zakřivení reálné geometrie vzorku chrániče nebylo v modelu uvažováno, neboť nemá významný vliv na velikost kontaktní síly, ze stejného důvodu je tloušťka pěny s ergonomickou funkcí připočtena do celkové tloušťky pěnové části. Výsledná kontaktní síla z modelu musela být pronásobena čtyřmi, vzhledem k uvažování symetrické čtvrtiny a filtrována vzhledem k povaze rázového děje. Porovnání nefiltrované a filtrované kontaktní síly je předmětem obr. 6.7.



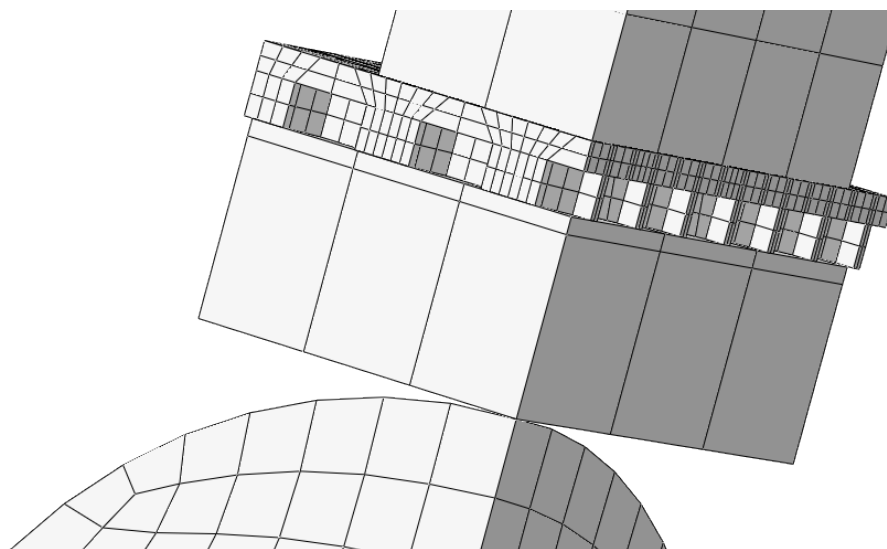
Obrázek 6.7: Výsledná kontaktní síla pro chránič PSÍ

Maximální hodnota kontaktní síly je 17,32 kN, což splňuje normu a koresponduje s výsledky reálného experimentu. Díky tomu lze použitý model prohlásit za verifikovaný. Toto tvrzení je ovšem platné pouze pro zkušební oblast A, neboť oblasti B odpovídá menší tloušťka voštinové části plastu a vnější hranici oblasti C již jen minimální, protože voština se postupně ztenčuje. Z tohoto důvodu byla provedena numerická simulace, kde z plastové části chrániče byla uvažována pouze nevoštinová část. Výsledná síla z této simulace je uvedena na obr. 6.8

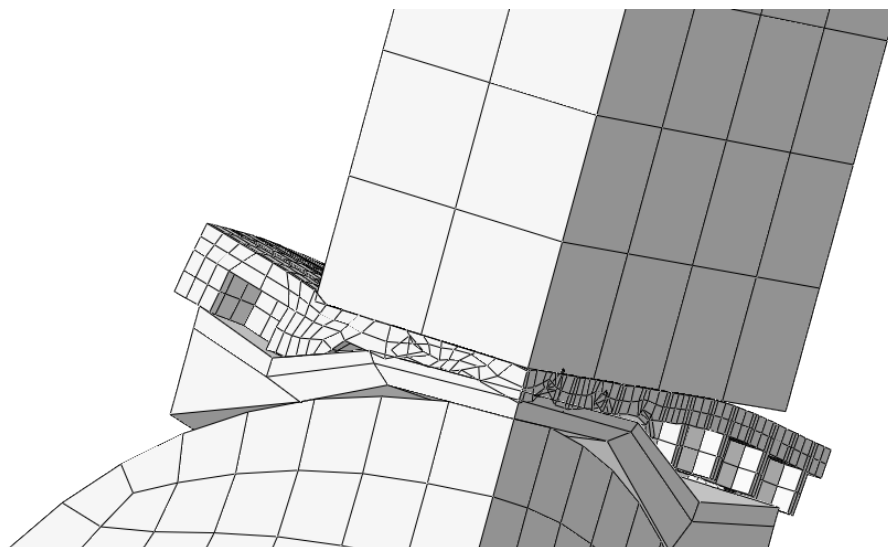


Obrázek 6.8: Výsledná kontaktní síla pro chránič PSÍ bez voštinové části plastu

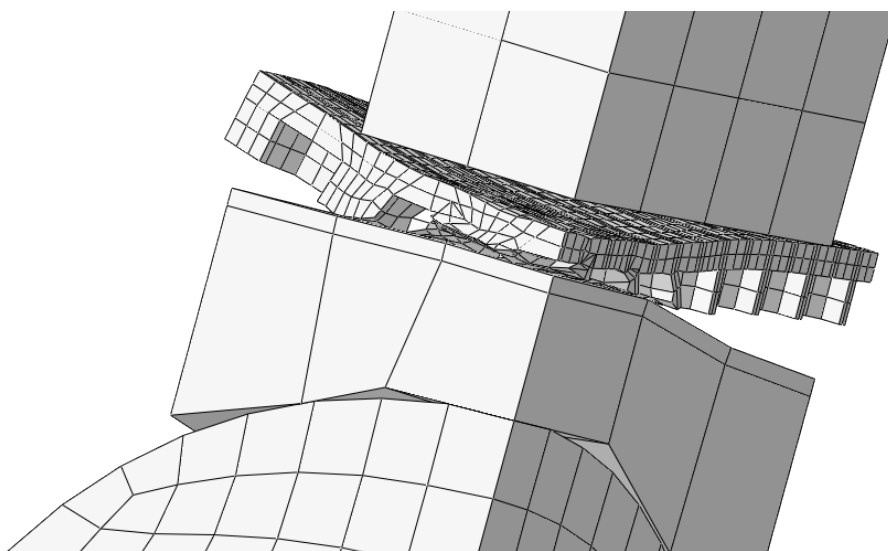
Maximum kontaktní síly získané ze simulace chrániče bez voštiny je 39,98 kN. Reálná hodnota maxima kontaktní síly pro zkušební oblasti B a C je nižší vzhledem k výše zmíněnému postupnému snižování tloušťky voštiny, nikoli její celkové absenci. I pro oblasti B a C tak výsledky odpovídají experimentu dle ČSN EN 1621-1. Na obr. 6.9 až 6.11 je vizualizace části modelu postihující vzorek pro zkušební oblast A pro začátek zkoušky, okamžik maximální kontaktní síly a odlehčení.



Obrázek 6.9: Vizualizace vzorku chrániče na začátku zkoušky



Obrázek 6.10: Vizualizace vzorku chrániče v okamžiku maximální kontaktní síly



Obrázek 6.11: Vizualizace vzorku chrániče po odlehčení

Kapitola 7

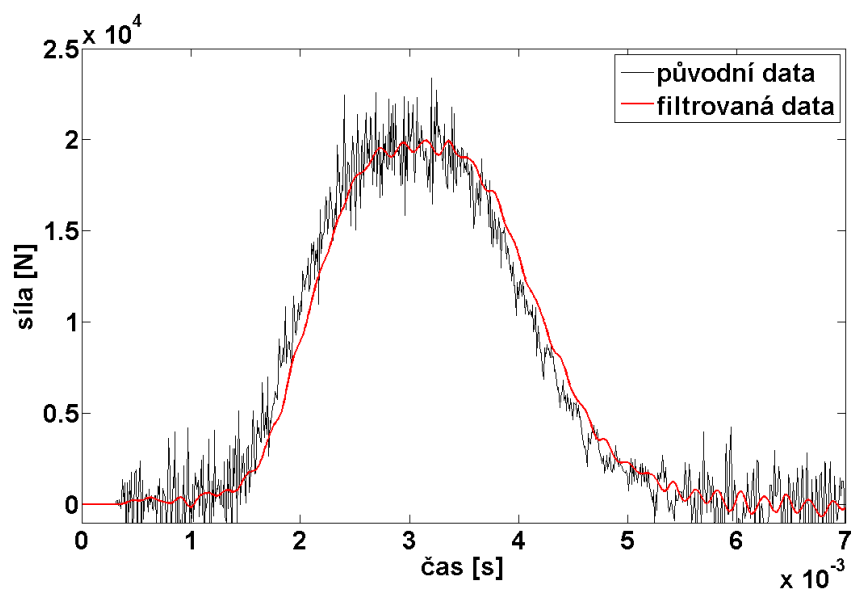
Modifikace

Provedené numerické simulace ukázaly výrazný vliv přítomnosti voštiny na velikost kontaktní síly. Při dodržení konstattní tloušťky voštiny přes všechny zkušební oblasti by chránič odpovídal požadavkům třídy provedení 2 (maximální hodnoty sil pro oblast A nesmí přesáhnout 20 kN a pro oblasti B a C 30 kN) při nepříliš velkém nárůstu hmotnosti. Hmotnost a cenu výroby takového chrániče by bylo možné snížit zmenšováním tloušťky pěnové části vzorku z původních 14,6 mm, za předpokladu neměnné tloušťky kůže 1,4 mm. V tab. 7.1 jsou uvedeny maximální hodnoty kontaktních sil pro vybrané tloušťky pěnové části chrániče PSÍ při jejím snižování.

Tabulka 7.1: Kontaktní síly při snižování tloušťky pěnové části

tloušťka [mm]	kontaktní síla [kN]
14,6 (původní)	17,32
12,6	17,86
10,6	18,89
8,6	19,53
6,6	19,96

Postupným snižováním tloušťky pěnové části byla stanovena hraniční tloušťka, při které by chránič stále vyhovoval požadavkům normy ČSN EN 1621-1, třídě provedení 2, na 6,6 mm. Této tloušťce odpovídala maximální kontaktní síla 19,96 kN, viz obr. 7.1.



Obrázek 7.1: Výsledná kontaktní síla při tloušťce pěnové části 6,6 mm

V neposlední řadě byl zjišťován vliv tloušťky kožené části na výslednou kontaktní sílu. Pro hraniční tloušťku pěnové části 6,6 mm byla provedena simulace pro zvýšení tloušťky kůže z 1,4 mm na 2,1 mm a snížení na 0,7 mm, což dokumentuje tab. 7.2.

Tabulka 7.2: Kontaktní síly pro příslušné tloušťky kožené části

tloušťka [mm]	kontaktní síla [kN]
0,7	20,01
1,4 (původní)	19,96
2,1	19,87

I takto výrazné změny rozměrů kožené části nepřinesly znatelné změny v hodnotě maximální kontaktní síly.

Kapitola 8

Závěr

Výsledky numerické simulace ukázaly že použitý model je možno považovat za verifikovaný, neboť jeho výstupy se shodují s výstupy reálného experimentu, tedy že chránič odpovídá požadavkům třídy provedení 1 normy ČSN EN 1621-1 a dá se považovat za ochranný prvek použitelný pro řidiče, kteří nejsou vystaveni zvýšenému riziku. Z navržených modifikací je patrné, že výrobní náklady i hmotnost chrániče by bylo možné snížit používáním tenčí vrstvy pěny. Ani při snížení tloušťky kůže nedojde k citelnému zvýšení maximálních hodnot kontaktních sil, i zde by tak byl prostor pro snížení nákladů, co se týče hmotnosti by byl vliv pozitivní, ovšem velmi nepatrný. Mírně negativní vliv na hmotnost by mělo zajištění konstantní tloušťky voštiny přes všechny zkušební oblasti. Tato modifikace by však zaručila výrazné snížení kontaktní síly a možnost splnění přísnější třídy provedení 2. Práce bude v budoucnu rozšířena o numerické simulace zkoušky dalších používaných chráničů, jejichž experimentální zkoušky jsou v práci také popsány.

Literatura

- [1] Bonkowski, T., et al. 2016. Tensile Test of Motorcycle Garment Leather.
- [2] Brinson, H. F., Brinson, L. C., 2008. *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*. New York: Springer-Verlag.
- [3] Deshmukh, S. S., McKinley, G. H., 2007. Adaptive energy-absorbing materials using fieldresponsive fluid-impregnated cellular solids. *Smart materials and structures*. Volume 16.
- [4] Kaňáková, S., 2017. *Identifikace materiálových parametrů pěny používané v chráničích motocyklistů*. Plzeň.
- [5] Khosroshahi, S.F., Galvanetto, U., 2015. New Energy Absorbing Materials and Systems. Motorist, 7th framework programme.
- [6] Kocáb, J., 2016. *Material Parameters Identification of Rheological Model of Rubber Matrix Composite*. Plzeň.
- [7] Montemayor, L. C., Greer, J. R., 2015. Mechanical Response of Hollow Metallic Nanolattices: Combining Structural and Material Size Effects. *Journal of Applied Mechanics*. Volume 82.
- [8] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2013. *CSN EN 1621-1, Ochranné oděvy pro motocyklisty proti mechanickému nárazu - Část 1: Chrániče kloubů proti nárazu pro motocyklisty - Požadavky a zkušební metody*. Praha.
- [9] Wadley, H.N.G., 2006. Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical transactions of the royal society A*. Volume 364.
- [10] en.wikipedia.org/wiki/Motorcycle_armor

- [11] en.wikipedia.org/wiki/Motorcycle_personal_protective_equipment
- [12] eshop.psihubik.cz
- [13] kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/gen_alg2/E_alg.htm
- [14] kmp.tul.cz/system/files/1_plast_uvod.pdf
- [15] koroyd.com/technology/
- [16] motoobleceni-dainese.cz/informace/historiedainese
- [17] motorcyclesafetynews.com/?tag=motorcycle-safety-history
- [18] newatlas.com/worldssmallestlattice41633